

# 复合材料薄层板常温固化翘曲分析

管旭 张洛明 张军

(郑州大学机械工程学院, 郑州 450001)

**摘要** 采用热传导和固化动力学方程计算出复合材料薄层板的生热率,并用 ANSYS 有限元分析软件对复合材料薄层板的固化温度场及应力场进行模拟,最后对翘曲变形进行预测。结果表明,在复合材料薄层板固化过程中,温度变化和材料热膨胀系数不一致是导致复合材料薄层板常温固化翘曲变形的的主要原因。

**关键词** 复合材料 薄层板 常温固化 翘曲 预测

纤维增强复合材料比刚度、比强度高,具有质轻、耐腐蚀、设计自由度大等特点,因此得到了广泛的应用。复合材料的固化过程是复合材料的基体材料发生化学交联反应的过程,是一个复杂的热、化学、力学的耦合变化过程,极易产生内部残余应力,从而发生翘曲变形。

Liu C J 等<sup>[1]</sup>从树脂材料角度研究了大型构件的变形和翘曲。M.W.Hyer<sup>[2]</sup>对经典层压板理论进行了改进,引入了几何非线性,得出了一些结论。张振国<sup>[3]</sup>研究了常温下树脂基复合材料层合板固化时的收缩及翘曲变形,认为层合板各层不同的树脂含量是翘曲变形的主要因素;对称的铺层结构能有效降低复合材料薄层板收缩与变形。张继奎<sup>[4]</sup>根据热传导和固化动力学理论,用三维有限元法,对正交各向异性复合材料层合板固化过程的温度和固化度历程及其变化规律进行数值模拟。结果表明,厚度越大,温度峰值越高,中心点开始固化越晚;不同纤维体积含量层合板在固化初期是同步的。官霆<sup>[5]</sup>分析复合材料铺层的微观结构,研究复合材料成型过程变形特点,以此建立两类针对性的有限元模型,并采用典型复合材料叠层板固化成型温度载荷,进行叠层板翘曲变形和板内应力的计算分析。

这些研究主要集中在温度热载荷作用下树脂收缩或铺层方式引起的翘曲变形,然而对生热率载荷作用下热膨胀系数不一致引起翘曲变形的研究很少。树脂交联反应是一个内部生热的过程,因此采用生热率载荷更符合实际情况。

笔者基于热传导控制方程和固化动力学方程,计算出固化过程中各个时段的生热率,建立复合材料薄层板的 ANSYS 模型,然后进行复杂温度场的模拟和热应力耦合分析,找出影响复合材料薄层板常温固化翘曲变形的因素。

## 1 模型的建立

图 1 为建立复合材料薄层板的 ANSYS 模型,上、下两块板均由玻璃纤维增强聚酯树脂组成。每块板长、宽均为 30 cm,厚 0.2 cm,模拟两层正交铺层。上下两铺层的材料参数按参考文献[6]如表 1、表 2 所示,材料热膨胀系数方向成 90°。复合材料薄层板网格模型采用 SOLID70 三维单元,并映射划分网格,如图 2 所示。分析单元数 28 800,节点总数 33 489。

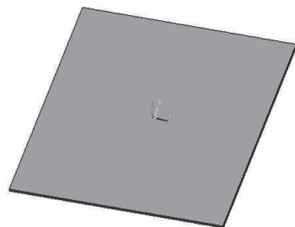


图 1 复合材料薄层板 ANSYS 模型

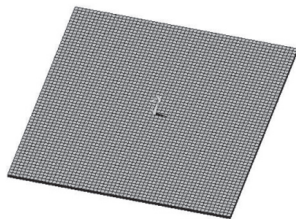


图 2 复合材料薄层板网格模型

表 1 复合材料薄层板热学性能参数

| 位置 | 材料 | 密度/<br>$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ | 比热容/<br>$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ | $K_{11}^{(1)} / \text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ | $K_{22}^{(1)} / \text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ | $K_{33}^{(1)} / \text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ |
|----|----|----------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| 上层 | 1  | 1890                                   | 1260                                                     | 0.4326                                                         | 0.2163                                                         | 0.2163                                                         |
| 下层 | 2  | 1890                                   | 1260                                                     | 0.2163                                                         | 0.4326                                                         | 0.2163                                                         |

注: 1) 三个主方向的热传导系数。

## 2 复合材料薄层板固化温度场分析

### 2.1 热传导控制方程和固化动力学方程

#### (1) 固化放热原理

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

表2 复合材料薄层板力学性能参数

| 位置 | $E_1^{(1)}/$<br>GPa | $E_2^{(1)}/$<br>GPa | $E_3^{(1)}/$<br>GPa | $G_{12}^{(2)}/$<br>GPa | $G_{23}^{(2)}/$<br>GPa | $G_{31}^{(2)}/$<br>GPa | $\mu_{12}^{(3)}$ | $\mu_{23}^{(3)}$ | $\mu_{31}^{(3)}$ | $\alpha_1^{(4)}/$<br>℃ | $\alpha_2^{(4)}/$<br>℃ | $\alpha_3^{(4)}/$<br>℃ |
|----|---------------------|---------------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 上层 | 132                 | 10.3                | 10.3                | 6.5                    | 3.91                   | 6.5                    | 0.25             | 0.38             | 0.25             | $0.018 \times 10^{-6}$ | $20.7 \times 10^{-6}$  | $20.7 \times 10^{-6}$  |
| 下层 | 10.3                | 132                 | 10.3                | 6.5                    | 6.5                    | 3.91                   | 0.25             | 0.25             | 0.38             | $20.7 \times 10^{-6}$  | $0.018 \times 10^{-6}$ | $20.7 \times 10^{-6}$  |

注:1)  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  分别为 1,2,3 主方向上的拉伸弹性模量;2)  $G_{12}$ 、 $G_{23}$ 、 $G_{31}$  分别为 1-2,2-3,3-1,平面的剪切弹性模量;3)  $\mu_{12}$ 、 $\mu_{23}$ 、 $\mu_{31}$ : 分别代表 2,3,1 方向作用时引起 1,2,3 方向应变的泊松耦合系数;4) 分别代表 1,2,3 方向的热膨胀系数。

来自基体树脂的放热化学反应。可以用 Fourier 热传导定律和能量平衡关系建立该问题的数学模型。三维有限元内热源各向异性材料的瞬态热传导控制方程为:

$$K_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + K_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} + \dot{Q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中:  $K_{xx}$ 、 $K_{yy}$ 、 $K_{zz}$ ——材料在 3 个主方向上的热传导系数。

$\dot{Q}$ ——热生成率,即单位时间内由于固化反应所产生的热量;

$\rho$ ——密度;

$c_p$ ——比热;

$T$ ——温度;

$t$ ——时间。

热生成率与固化反应速率有关,可以用(2)式表示:

$$\dot{Q} = \rho(1 - V_f)H_R \frac{d\alpha}{dt} \quad (2)$$

式中:  $V_f$ ——纤维体积含量;

$H_R$ ——单位质量树脂固化总反应放热,其值由实验测定;

$\alpha$ ——固化度,表示固化反应进行的程度。

固化反应速率用固化反应动力学方程表示为:

$$\frac{d\alpha}{dt} = f(\alpha, t) \quad (3)$$

$f(\alpha, t)$ 具体形式由实验测定。聚酯树脂固化动力学经验公式为:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp(-\Delta E/RT) \alpha^m (1 - \alpha)^n \quad (4)$$

式中:  $A$ ——频率因子;

$R$ ——普适气体常数,  $R=8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ ;

$m$ ——树脂材料的试验拟合常数;

$n$ ——树脂材料的试验拟合常数;

$\Delta E$ ——活化能。

## (2) 温度场方程

在一般三维问题中,根据 Fourier 传热定律和能量守恒定律,可以建立传热问题的控制方程,即瞬态温度场的场变量  $\Theta(x, y, z, t)$  在直角坐标中应满足的微分方程是:

$$\rho c \frac{\partial \Theta}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial y} (K_{xx} \frac{\partial \Theta}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y} (K_{yy} \frac{\partial \Theta}{\partial y}) - \frac{\partial}{\partial z} (K_{zz} \frac{\partial \Theta}{\partial z}) - \rho q = 0 \quad (5)$$

求解域  $\Omega$  的温度场分布,应满足边界条件:

$$\Theta = \bar{\Theta} \quad (\text{在 } \Gamma_1 \text{ 边界上}) \quad (6)$$

$$K_{xx} \frac{\partial \Theta}{\partial x} n_x + K_{yy} \frac{\partial \Theta}{\partial y} n_y + K_{zz} \frac{\partial \Theta}{\partial z} n_z = q \quad (\text{在 } \Gamma_2 \text{ 边界上}) \quad (7)$$

$$K_{xx} \frac{\partial \Theta}{\partial x} n_x + K_{yy} \frac{\partial \Theta}{\partial y} n_y + K_{zz} \frac{\partial \Theta}{\partial z} n_z = h(\Theta_a - \Theta) \quad (\text{在 } \Gamma_3 \text{ 边界上}) \quad (8)$$

式中:  $\rho$ ——密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$c$ ——材料比热容,  $\text{J/kg} \cdot \text{K}$ ;

$\bar{\Theta} = \bar{\Theta}(\Gamma, t)$ —— $\Gamma_1$  边界上的给定温度;

$q = q(\Gamma, t)$ —— $\Gamma_2$  边界上的给定热流量,  $\text{W/g}$ ;

$n_x$ 、 $n_y$ 、 $n_z$ ——边界外法线的方向余弦;

$h$ ——物体与周围介质的表面传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;

$\Theta_a = \Theta_a(\Gamma, t)$ ——在自然对流条件下是外界环境温度;在强迫对流条件下是边界层的绝热壁温度;

$\Omega$  域的全部边界  $\Gamma$  应满足:  $\Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3 = \Gamma$ 。

## 2.2 生热率的计算与验证

根据热传导控制方程和固化动力学方程,采用文献<sup>[4]</sup>中的复合材料薄层板热学性质参数和固化度曲线数据,计算出复合材料薄层板固化过程中随时间变化的生热率,如图3所示。

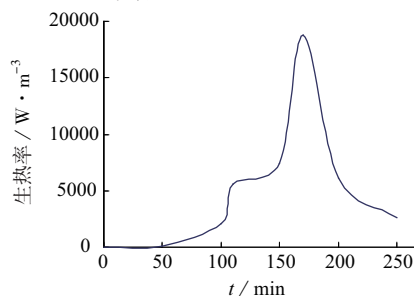


图3 复合材料薄层板生热率历程图

依照文献<sup>[4]</sup>中 GF 增强聚酯复合材料薄层板模型,建立长、宽均为 15.24 cm,厚度为 2.54 cm 的

ANSYS 模型,如图 4 所示。材料参数和边界条件与文献中一致,给定边界条件,用对流换热系数  $h$  与导热系数  $k_{11}$  的比值表示。上表面  $h/k_{11}=87\text{ m}^{-1}$ ,下表面  $h/k_{11}=125\text{ m}^{-1}$ ,四周绝热,环境温度变化如表 3 所示,施加生热率并求解。

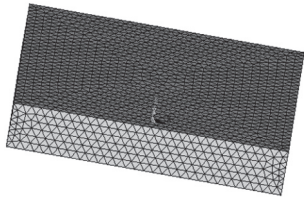


图 4 复合材料薄层板生热率验证模型图

表 3 复合材料薄层板边界温度参数

| 时间/min | 0  | 50 | 100 | 110 | 150 | 170 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
|--------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 边界/℃   | 20 | 80 | 85  | 85  | 85  | 88  | 95  | 110 | 20  | 20  | 20  |

进入时间历程后处理器,得到模型上下表面及中心点温度的时间历程曲线图,如图 5 所示。由图 5 可知,在固化过程的开始阶段,上下表面温度高于中心,热量从上表面、下表面流向中心,此时树脂交联反应速率非常缓慢,放热量很小;随着温度的升高,交联反应速率逐渐加快,放热增加,热量增加。由于树脂基体导热性能较差,在 110 min 左右层合板中心温度超过上下表面,整个层合板的温度也高于热压罐环境温度;在 170 min 左右温度达到峰值,随后,交联反应速率迅速减小,至 200 min 左右层合板中心温度低于表面。

将图 5 与文献[4]中上下表面及中心点温度的时间历程曲线图进行对比如表 4 所示。

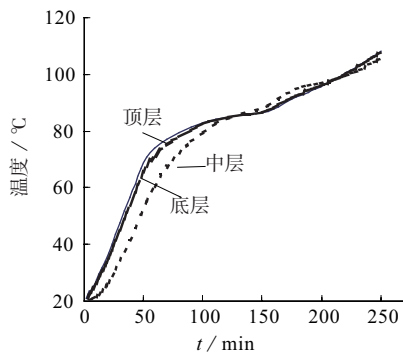


图 5 上下表面及中心点温度历程图

表 4 模型温度值对比

| 项目                | 50 min | 110 min | 170 min |
|-------------------|--------|---------|---------|
| 图 5               | 64℃    | 84℃     | 93℃     |
| 文献 <sup>[4]</sup> | 60℃    | 85℃     | 100℃    |

由表4可以看出,温度值平均误差率在5%左右,因此可以认为,对生热率值的计算是完全合理的。

### 2.3 复合材料薄层板温度场的模拟

由于图 1 所示模型的侧面面积远小于上下两个表面的面积,故模型的侧面散热很小可以忽略,只对上下两个面施加空气自然对流系数和边界常温,并对模型施加生热率,其中生热率如图 3 所示。计算时间 400 min,其中 250 min 以后生热率为零,为复合材料薄层板自然冷却时间。

图 6 为模型上表面中心点温度的时间历程图。由图 6 可知,温度在 183 min 左右时达到高峰,其值为 23.65℃,与最低温度 20℃相差 3.65℃,显然复合材料薄层板在固化到冷却过程中温度的变化并不是很明显。图 7 为复合材料薄层板放热高峰温度云图。从图 7 可以看出,复合材料薄层板各处温度差不是很大,分布较均匀,并没有太复杂的温度梯度,其温度单位为 K,主要是因为复合材料薄层板厚度太小。

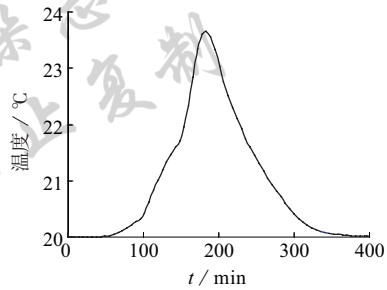


图 6 复合材料薄层板上表面中心点温度历程图

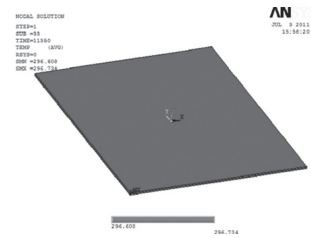


图 7 复合材料薄层板放热高峰温度云图

### 3 复合材料薄层板热应力分析

将复合材料薄层板模型中心 4 个节点施加全约束,并将上节温度场求解结果作为载荷施加到该模型上并求解,结果如图 8、图 9 所示。



图 8 复合材料薄层板等效应力云图



图 9 复合材料薄层板变形图

从图 8 可以看出,最大热应力出现在薄层板中间层,其中最大值在薄层板中间层 4 个角处;由图 9 可知,模型 4 条边靠近中点的部位偏移距离最大,变形也最大,其中最大变形处变形偏离距离为 1.498 cm。

由于纤维和基体的线膨胀系数不同,一般材料的横向线膨胀系数要远远大于纵向线膨胀系数<sup>[7]</sup>。横向模量则远远小于纵向模量,对于采用的 $[0^\circ/90^\circ]$ 铺层方式的薄层板,由于纵向和横向线膨胀系数的不同,固化时因温度发生变化导致的固化变形非常明显,最终变成如图 9 所示的鞍形。文献[8]认为以 $[0^\circ/90^\circ]$ 铺层方式的层合板,当结构尺寸较小时,固化变形位移场为马鞍形分布,与笔者的预测结果一致,说明此研究方法合理。根据预测,随着薄层板尺寸的增加,变形将从鞍形变为单曲形,这有待今后进一步研究证实。

#### 4 结论

(1) 依据热传导控制方程和固化动力学方程,采用文献[4]中的模型和数据,逆向算出复合材料薄层板的生热率,成功模拟了该文献中复合材料薄层板固化过程中的温度场并验证了生热率值的合理性。

(2) 复合材料薄层板在常温固化过程中温度场分布较均匀。

(3) 复合材料薄层板固化过程中树脂交联反应放热产生变化的温度场,并由于复合材料薄层板的热膨胀系数不一致产生不均匀应力,最终导致翘曲变形。

#### 参考文献

- [1] Liu C J, Kiasat M S, Nijho A H J, et al. The effect of addition of a low profile additive on the curing shrinkage of an unsaturated polyester resin [J]. Polymer Engineering and Science, 1999, 39 (1): 18-25.
- [2] Hyer M W. The room-temperature shapes of four-layer symmetric cross-ply laminates [J]. Journal of Composite Materials, 1982, 16 (5): 318-340.
- [3] 张振国. 复合材料薄层板常温固化收缩及翘曲变形[J]. 河南科技大学学报, 2009, 309 (6): 1-4.
- [4] 张纪奎. 热固性复合材料固化过程中温度场的三维有限元分析[J]. 复合材料学报, 2006, 23 (2): 175-179.
- [5] 官霆. 复合材料叠层板固化成型后的变形分析计算[J]. 宇航材料工艺, 2006 (1): 34-37.
- [6] 张剑. 复合材料大层层合板热变形热应力有限元分析[J]. 固体力学学报, 1997, 18 (4): 359-364.
- [7] Hull D. An introduction to composite materials [M]. Cam-bridge University Press, 1988.
- [8] Cho M, Kim M H, Chung C H, et al. A study on the room-temperature curvature shapes of unsymmetrical laminates including slippage effects [J]. Journal of Composite Materials, 1988, 32 (5): 460-483.

### ANALYSIS OF CURING WARPAGE OF COMPOSITE THIN LAMINATES AT ROOM TEMPERATURE

Guan Xu, Zhang Luoming, Zhang Jun

(School of Mechanical Engineering Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**ABSTRACT** The heat generation of composite thin laminates was figured out by thermal conduct theory and cure kinetics equation. The history of curing temperature and curing stress field for composite thin laminates was simulated by ANSYS software. Then the warpage deformation of the model was predicted. The results showed that the variation of the temperature and the discord of material coefficient of thermal expansion were the two main factors which resulted in curing warpage deformation of composite thin laminates.

**KEYWORDS** composite material, thin laminates, room temperature curing, warpage, prediction

#### 2011 年全球生物可降解塑料包装市场估值达 18.5 亿美元

生物可降解塑料包装市场在全球包装行业的意义越来越大。经济衰退影响各种包装需求;环境问题迫在眉睫,油气储备减少引起忧虑,导致生物可降解塑料包装稳定增长。

汇信资本有限责任公司预计全球包装市场,尤其是生物可降解包装市场将稳步增长。据估算,2011 年全球生物可降解包装市场将达 18.5 亿美元。在经济危机中保持正增长的新兴经济体发展势头仍然强劲,这将促进生物可降解塑料包装产品在未来十年内的需求。促进生物可降解塑料包装的主要因素还包括消费者及零售商对环保包装的接受度、行

业规章制度的改革及生物塑料袋的支持率。同时,在轻质包装方面的技术提高将进一步促进业内需求。主要业内人士及生产商开始选择再生材料制作包装以避免垃圾填充。环保及可持续性已成为所有包装产品的基本质量标准。

因此生物可降解塑料包装前景极好。汇信资本将生物可降解塑料包装的发展推动因素归纳为 3 点:产品包装的环保性及可持续性要求;全球追求更健康的生活方式;新兴市场迅速发展,对生物可降解塑料包装的需求日益增大。

(工塑网)