

# 铺层角度偏差对曲面复合材料结构 固化变形的影响分析

卞 航,梁宪珠,张 铨,田宏伟

(北京航空制造工程研究所,北京 100024)

**摘 要:** 本文阐述了铺层角度偏差对某变厚度曲面结构复合材料固化变形的影响。对铺层角度偏差的来源进行了归纳,采用考虑热膨胀和固化收缩的固化变形计算模型,对该变厚度的复合材料曲面层合板结构的固化变形进行了计算,计算结果与试验结果较为吻合,表明了计算模型的准确性。采用均匀试验设计方法,得到了该曲面结构铺层角度偏差在  $5^\circ$  以内变化时的实验方案,对实验设计的计算结果进行了回归分析,结果显示,对于该曲面复合材料结构,总体上铺层角度偏差对固化变形的影响不大,相对的,  $-45^\circ$  的铺层偏差对固化变形的影响较大,  $90^\circ$  的铺层偏差对固化变形的影响较小。

**关键词:** 复合材料; 铺层角度偏差; 固化变形

**中图分类号:** TB332 **文献标识码:** A

复合材料以其质轻高效的特点,日益广泛地应用于国民生产的各个领域,在航空制造中,复合材料用量的多少已经成为一架飞机先进与否的标志。然而,复合材料在固化过程中,由于自身材料的各向异性及外来因素如工艺及环境的影响,会产生偏离理想形状的变形。本文仅仅对工艺制造中,纤维铺层角度偏差对固化变形的影响进行讨论。

## 1 铺层角度偏差来源

复合材料构件在制造过程中由操作人员根据设计要求的铺层取向对构件进行逐层铺叠,铺叠后各铺层纤维的实际取向与设计取向之间会存在差异,将此差异称为铺层角度偏差。铺层角度偏差由下料误差和铺叠误差两部分组成<sup>[1]</sup>(见图1):

下料误差是操作人员或下料设备在布状预浸料上进行铺层切割时因偏移切割基准而生成的取向误差。下料误差与下料设备精度和操作人员的熟练程度有关。

铺叠误差是操作人员在将新铺层铺放于构

件已有铺层之上时,因铺层基准边偏移铺放基准而产生的取向误差。铺叠误差的分布状况与操作人员的熟练程度,铺叠模具尺寸和复杂程度以及样板或设备精度有关。

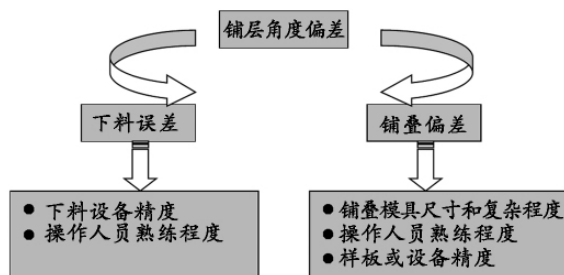


图1 铺层角度偏差的来源

## 2 固化变形计算模型

文献<sup>[2]</sup>对固化变形产生的各种因素进行了综述,分析了各因素对固化变形的影响。热膨胀是材料残余应力和变形产生的重要因素,对于绝大部分复合材料来说,纤维的热膨胀性能要小于基体材料的热膨胀性能,因此,复材固化后,纤维将要承受压应力而基体承受拉应力。对于层合

收稿日期:2012-02-09

基金项目:民机复合材料机翼基础及关键技术研究

作者简介:卞航,男,北京航空制造工程研究所,主要从事复合材料工艺研究与制造。

板来说,热应力的分布更加复杂,因为在层合板内不仅纤维和基体之间存在热应变,铺层与铺层之间同样存在热应变。

固化过程中,树脂的化学收缩也不能忽略,Holmberg 通过对碳/环氧复合材料系统试验,得知化学收缩对变形有着重要影响<sup>[3]</sup>。在文献<sup>[4]</sup>中,Dong Chensong 博士指出,不匹配是产生固化变形的重要因素。固化变形 90% 是由 CTE (热膨胀系数) 不匹配和固化收缩引起的,模具/制件的相互作用及其它因素对固化变形的贡献为 10%。

基于以上结论,本着简化模型的原则,建模时只考虑 CTE 不匹配和固化收缩这两个因素对固化变形的影响。

可以将树脂的固化收缩和热膨胀合起来当作树脂的等效热膨胀,以简化计算,热膨胀可以通过材料的热膨胀系数来反映,而固化收缩是由分子在固化反应过程中的重新排列引起的,在这一过程中,树脂的模量显著增加,体积收缩,由于纤维没有发生化学收缩,因此可以用混合规则来计算层合板的收缩,基于此,引出等效热膨胀系数(CTE),用它来表示固化过程中树脂的收缩。通过把固化收缩转化成 CTE 的形式,CTE 不匹配和固化收缩的影响就可模型化。固化收缩可以表示成  $V_s$ ,树脂的体积变化为  $1 + V_s$ ,忽略高阶项,可以由下面的方程表示<sup>[5]</sup>:

$$[1 + V_s / (3\Delta T)]^3 = 1 + 3V_s / (3\Delta T) + 3[V_s / (3\Delta T)]^2 + [V_s / (3\Delta T)]^3$$

树脂的等效 CTE 可以表示成为:

$$\alpha_r^e = \alpha_r / V_s (3\Delta T)$$

式中, $\alpha_r^e$  为树脂的等效热膨胀系数, $\alpha_r$  为树脂的热膨胀系数  $V_s$ , $\Delta T$  为温度变化量。

在进行复合材料有限元建模时,通常采用三维实体单元或壳单元,对于对称铺层的平板或曲板,如果采用壳模型,则材料面内和法向的材料特性及热膨胀系数的各向异性就无法得到反映,对于平板或规则的曲面结构,采用三维实体单元,分层建模,输入材料参数,可以进行固化变形的计算,对于不规则的曲面结构,由于材料坐标系随着型面在变化,因此,即使采用繁琐的三维实体单元,对各铺层的角度也无法准确赋值。为解决上述问题,本文采用三维铺层连续单元(sol-

id composite), 这样,法线方向的正应力及热膨胀系数可以得到很好的考虑,坐标系可以随着型面发生变化,模拟更接近真实情况。

### 3 算例验证

本文对一变厚度曲面层合板结构件进行了分析,该曲面层合板采用中航复合材料公司生产的 CCF300/QY9511 预浸料,单层厚度为 0.125 mm,固化温度为 195 °C。结构的尺寸如图 2 所示,其中, A、C 区域分别为 48 层,铺层顺序为  $[\pm 5/-45/0/90/0/45/0/45/-45/0/-45/90/-45/45/-45/90/-45/90/-45/0/45/0/45/0]_s$ , B 区 28 层,铺层顺序为  $[\pm 5/-45/0/90/45/0/45/-45/0/-45/90/-45/45/0]_s$ , 区域 A、B 之间, B、C 之间分别有一宽度为 40 mm 的过渡区。材料的性能参数见表 1。

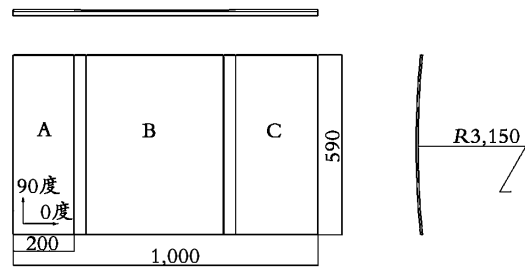


图 2 变厚度曲面层合板结构

表 1 CCF300/QY9511 力学性能参数

| $E_1 /$<br>GPa | $E_2 /$<br>GPa | $\nu_{12} /$<br>— | $G_{12} /$<br>GPa | $\alpha_1 /$<br>$10^{-6} / ^\circ\text{C}$ | $\alpha_2 /$<br>$10^{-6} / ^\circ\text{C}$ |
|----------------|----------------|-------------------|-------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 136            | 11.3           | 0.28              | 6.5               | 0.06                                       | 30.0                                       |

为简化计算,忽略原模型的变厚区,计算模型如图 3 所示,采用 ABAQUS 软件进行计算,采用静力分析,施加温度载荷,约束结构的几何中心点,网格大小为 15 mm × 15 mm,

计算得到面外最大固化变形为 0.1691 mm,整体变形为 0.68 mm,变形云图见图 4。

采用热压罐成型工艺成型该复合材料变厚度曲面结构,室温脱模后,采用塞尺对其变形进行了测量(见图 5),面外方向实测结果为 0.15 mm。

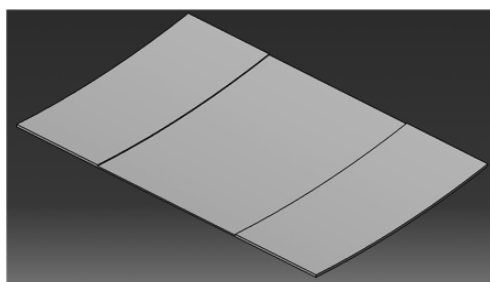


图 3 简化的计算模型

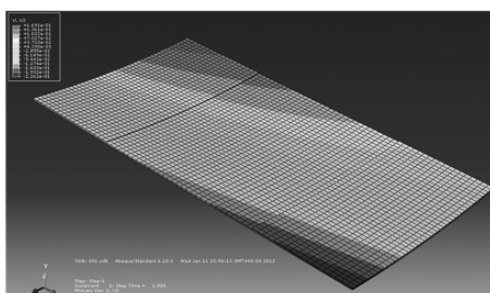


图 4 面外最大变形

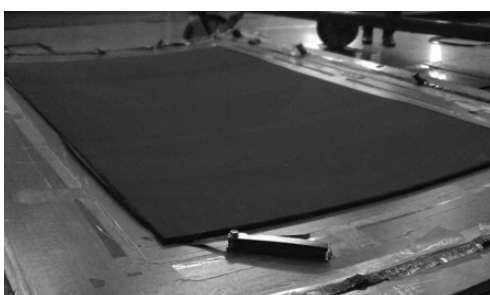


图 5 变形实测

与试验相比,计算误差为 12.7%。可见,采用上述方法能有效的预测固化变形。产生的误差,分析认为,主要是由于对模具因素的忽略。

## 4 实验设计

平板结构理论上不会产生固化变形,如果在制造过程中,每一层都产生铺叠误差,而整体上仍保持对称,则理论上仍不会产生变形。对于曲面结构则会有所不同。为了表述不同铺层角产生铺层偏差对曲面结构固化变形的影响大小,假设在制造过程中,叠层板的铺层角度会产生  $5^\circ$  以内的偏差,可以设计以下实验。水平和因素数见表 2,其中,水平数表示偏差的角度值,因素表示铺叠的四个角度。

表 2 水平数和因素

|            |           |            |             |            |   |    |    |    |    |    |
|------------|-----------|------------|-------------|------------|---|----|----|----|----|----|
| 水平数(10 个): | 5         | 4          | 3           | 2          | 1 | -1 | -2 | -3 | -4 | -5 |
| 因素(4 个):   | $0^\circ$ | $45^\circ$ | $-45^\circ$ | $90^\circ$ |   |    |    |    |    |    |

采用均匀设计(uniform design, UD)法,选用  $U_{10}^*(10^8)$  设计表,得到上述水平和因素的实验设计表,见表 3。

表 3 铺层偏差的试验设计表

| 因素<br>实验号 | $0^\circ$ | $45^\circ$ | $-45^\circ$ | $90^\circ$ |
|-----------|-----------|------------|-------------|------------|
| 1         | 5         | 48         | -47         | 91         |
| 2         | 2         | 44         | -42         | 85         |
| 3         | 3         | 41         | -50         | 92         |
| 4         | 4         | 50         | -46         | 86         |
| 5         | 1         | 47         | -41         | 93         |
| 6         | -1        | 43         | -49         | 87         |
| 7         | -2        | 40         | -44         | 94         |
| 8         | -3        | 49         | -40         | 88         |
| 9         | -4        | 46         | -48         | 95         |
| 10        | -5        | 42         | -43         | 89         |

将层合板的原始铺层依次按照实验号 1-10 设计,计算得到 10 次实验的固化变形大小,见表 4。其中,  $X_1$  至  $X_4$  分别表示铺叠角度  $0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ$ ,  $Y$  表示整体固化变形大小。

表 4 计算结果

| $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $Y/\text{mm}$ |
|-------|-------|-------|-------|---------------|
| 5     | 3     | 2     | 1     | 0.66          |
| 4     | -1    | -3    | -5    | 0.71          |
| 3     | -4    | 5     | 2     | 0.79          |
| 2     | 5     | 1     | -4    | 0.77          |
| 1     | 2     | -4    | 3     | 0.68          |
| -1    | -2    | 4     | -3    | 0.71          |
| -2    | -5    | -1    | 4     | 0.72          |
| -3    | 4     | -5    | -2    | 0.64          |
| -4    | 1     | 3     | 5     | 1.04          |
| -5    | -3    | -2    | -1    | 0.81          |

可以看出,当铺层角度偏差在  $5^\circ$  范围内变化时,变厚度曲面结构的整体固化变形的变化在

0.9 mm 之内,如图 6 所示。

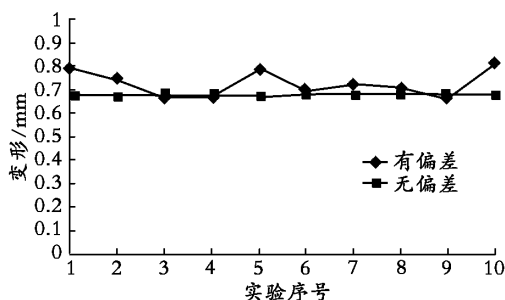


图 6 采用均匀法的固化变形计算结果

通过回归分析,可以得到回归系数和各因素的  $t$  值,见表 5。

表 5 各因素的回归系数和  $t$  值

|       | 系 数      | 标准误差     | $t$ 值    |
|-------|----------|----------|----------|
| 常数项   | 0.7256   | 0.019776 | 36.6918  |
| $X_1$ | 0.004332 | 0.006545 | 0.661885 |
| $X_2$ | -0.0032  | 0.006463 | -0.49494 |
| $X_3$ | -0.01025 | 0.006545 | -1.56546 |
| $X_4$ | 0.001934 | 0.006463 | 0.299289 |

可以得到该问题的回归方程为:

$$y = 0.725 + 0.0043X_1 - 0.0032X_2 - 0.0102X_3 - 0.0019X_4$$

根据  $t$  值可以看出,相对来说,  $-45^\circ$  的铺层

偏差对固化变形的影响较大,  $90^\circ$  的影响较小。

## 6 结论

本文建立了变厚度曲面结构复合材料固化变形模型,通过试验验证了该模型的准确性。采用均匀设计法,通过模拟分析,可以得到:

当该曲面结构复合材料结构的铺层角度偏差在  $5^\circ$  以内时变化时对固化变形的影响不大;

由回归分析模拟结果可知,本文所研究的曲面复合材料结构中,  $-45^\circ$  的铺层偏差对固化变形的影响较大,  $90^\circ$  的铺层偏差对固化变形的影响较小。

参考文献:

- [1] 戴棣. 复合材料结构件的固化变形研究 [D]. 南京航空航天大学, 2000.
- [2] 寇哲君, 龙国荣. 热固性树脂基复合材料固化变形研究进展 [J]. 宇航材料工艺, 2006 增刊: 7-11.
- [3] Holmberg J A. Influence of chemical shrinkage on shape distortion of RTM composite [C]. Proc 19 [3] international SAMPE European Conference of the society for advancement of material and process engineering, Paris, France, 22-24, April, 1998: 621-632.
- [4] Dong C S. Dimension variation prediction and control for composites [D]. The Florida State University College of Engineering, 2003.

## The Effect of Ply Angle Declination on Deformation of Cure Composite Structure

BIAN Hang, LIANG Xian-zhu, ZHANG Cheng, TIAN Hong-wei

(Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China)

**Abstract:** The effect of ply angle declination on deformation of a curved composite laminate with varied thickness has been studied in this paper. The resources of ply angle declination were drawn, was caculated with a model in which thermal expansion and curing shrinkage was considered. The cure deformation of the composite curve laminate. The caculated result is conformed with experiment test, showing the calculation model is approvable. By using the uniform design, the design of experiments was achieved when the ply angle declination with in 5 degree of each ply angle. The regression was used to analysis the result of the design of experiments, which shows that in general, ply angle declination has few effect on cure deformation, relatively the ply angle declination of  $-45$  degree has more effect on cure deformation than ply angle declination of  $90$  degree does.

**Keywords:** Composite; Ply angle declination; Cure deformation

(编辑: 张迎元)