

# 单向带预浸料在不可展曲面上铺贴变形的研究

## Study on the Deformation of the Unidirectional Prepreg Overlay on an Undevelopable Surface

中航复合材料有限责任公司 匡载平 戴 棣 王文贵

**[摘要]** 针对单向带预浸料在不可展曲面上铺贴过程中其变形量超过一定程度会产生铺贴缺陷的现象,采用变形角度表征变形量,设计了测量变形角度的试验方法,研究了变形角度与铺贴缺陷的关系,定义了变形角度警告值与限制值,通过设计正交试验测定了变形角度警告值与限制值,并确定了其影响因素,为单向带预浸料铺贴复杂型面的可制造性分析奠定了基础。

**关键词:** 复合材料 单向带预浸料 铺贴变形 变形角度

**[ABSTRACT]** The excessive overlaying deformation will bring on defects, When the unidirectional prepreg overlay on an undevelopable surface, characterize the deformation using the deformation angle, design experiment method for measuring the deformation angle, study the relationship between the deformation angle and defects, define the warn value of deformation angle and the limit value of deformation angle, and find influencing factors for analyzing the producibility of the unidirectional prepreg overlaying on a complex surface.

**Keywords:** Composites Unidirectional prepreg Overlaying deformation Deformation angle

复合材料高比强度、高比模量的特点使其成为飞机主要结构材料,复合材料在飞机上的用量已成为衡量飞机结构先进性的重要指标之一。F35 战斗机复合材料用量约占结构总重量的 35%, B787 和 A350 飞机复合材料用量约占结构总重量的 50%。

单向带预浸料铺贴工序是制造复合材料零件过程中的重要工序<sup>[1]</sup>。预浸料在不可展曲面上铺贴时会发生变形,即纤维间相互位置的变化。当变形量超过一定程度会产生铺贴缺陷,如纤维皱褶、分叉。因此,变形量的表征和测定是预浸料铺贴可制造性分析的必要前提。由于飞机结构涉及大量复杂的曲面形状,对这方面研究工作的必要性非常明显。本论文的研究内容正是基于这一需求展开的。

### 1 变形量的表征

为了预测单向带预浸料在曲面上铺贴后的纤维方

向与相关缺陷,前人开发了多种描述铺贴状态的数学模型和计算机模拟程序,并在建模问题上已有共识<sup>[2-5]</sup>。

目前,常用的建模方法为映射方法(Mapping Approach)。映射方法集中研究将原始平面形状的单向带预浸料铺贴成最终曲面形状涉及的几何问题。映射方法可提供铺贴状态的几何信息:铺贴后预浸料每一点位于模具表面上的位置及纤维方向。但该方法不考虑铺贴过程中所施加的力。因此,方法隐含的假设是:(1)可以对预浸料施加任何完成铺贴所需要的力;(2)预浸料可以发生铺贴所需的任意大的变形。但实际情况表明,当变形超过一定程度时会产生铺贴缺陷,缺陷一旦产生,映射方法的预测结果即与实际情况产生差异。

映射方法提供了一种预测单向带预浸料变形量的手段,可以通过预测理想状态下预浸料的变形量来判断缺陷产生的位置。单向带预浸料的变形模式是纤维间的距离恒定,纤维间的相互位置可以发生变化,如图 1 所示。但此变形量并非无限制,当变形量超出一定范围时,实际的工艺过程会产生铺贴缺陷<sup>[6]</sup>。为了研究方便,用变形角度  $\theta$  来表征变形量, $\theta$  是  $\Delta B$  与  $W$  的函数。

$$\theta = \arctan \frac{\Delta B}{W}, \quad (1)$$

式(1)中, $\Delta B$ 、 $W$  分别是纤维间相互位置变化量和纤维之间的距离。

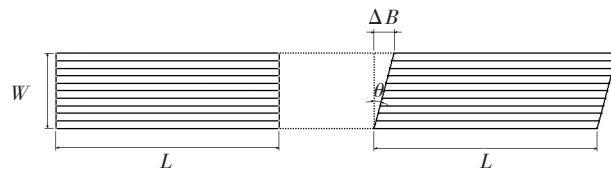


图1 单向带预浸料变形模式

Fig.1 Deformation mode of the unidirectional prepreg

### 2 变形角度警告值与限制值的测定与分析

本文用变形角度  $\theta$  表征单向带预浸料在铺贴过程中的变形角度。变形角度  $\theta$  的测定是预浸料铺贴可制造性分析的必要前提。因此,有必要设计试验方法测量单向带预浸料的变形角度并分析其影响因素。

#### 2.1 试验材料及工具

试验原材料:干法制备的含胶量分别为 30.1%、

35.1% 和 40.3% 的单向带预浸料(T700/QY8911)。

试验其他材料: AIRTECH 公司生产的脱模材料 Tooltec® A005 (后文简称为 A005), 双面胶带、黄胶带。

试验工具: 试验平台 2000mm × 1000mm、直尺、量角器、记号笔、钢板 300mm × 50mm × 4mm。

## 2.2 试验方法

目前, 内外没有标准的试验方法测量单向预浸料纤维的变形量。开始利用单向带预浸料变形模式的原理设计了一套测量夹具, 先把尺寸为 200mm × 200mm 的单向带预浸料试样平整地夹持在夹具上, 固定一边, 滑移另一边使单向带预浸料变形。从结果可以看出单向带预浸料在夹持边缘和 4 个角的位置容易产生褶皱、分叉等缺陷, 而其他部分并没有发生变形, 如图 2 所示。这一现象主要由于单向带预浸料垂直纤维方向没有约束, 使得其边界的力无法传递到其他部位, 从而导致受力不均匀, 边界受力最大, 容易产生缺陷。因此这种试验方法很难保证结果的准确性, 必须设计其他试验方法

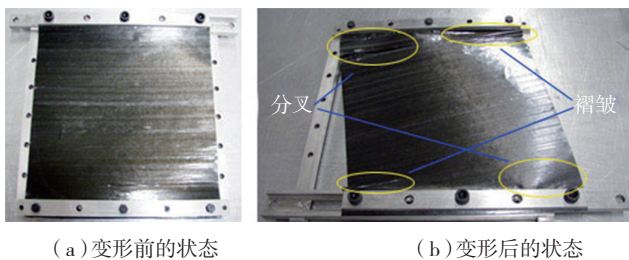


图2 利用夹具测量单向带预浸料变形角度

Fig.2 Experiment of measuring the deformation angle using fixture

来测量单向带预浸料纤维的变形角度。

经过多次试验探索, 最终设计了测量单向带预浸料变形角度的试验方法, 单向带预浸料从  $\square ABCO$  形状变形至  $\square A'B'C'O$  形状的变形角度为  $\theta$ , 如图 3 (a) 所示; 把变形后的单向带预浸料形状以  $O$  点为旋转点顺时针旋转  $\theta$  便得到测量方法示意图, 如图 3 (b) 所示。即把一定长度、宽度的单向带预浸料试样平放在平面内, 纤维方向与横轴方向平行, 固定  $AO$  边, 缓慢滑移  $BC$  边

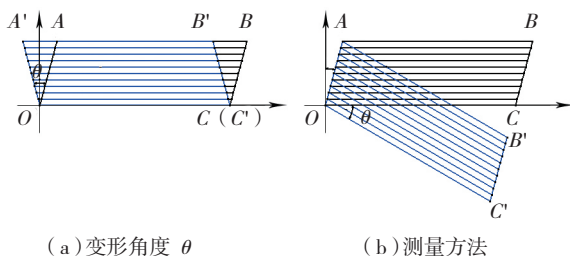


图3 测量单向带预浸料变形角度示意图

Fig.3 Diagrammatic sketch of measuring the deformation angle



(a) 试验前的状态



(b) 试验后的状态

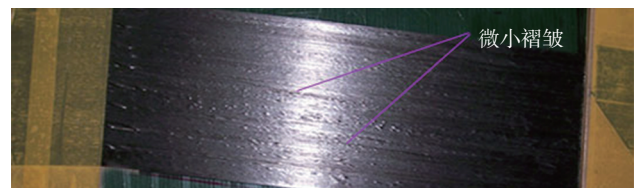
图4 测量单向带预浸料变形角度试验

Fig.4 Experiment for measuring the deformation angle 使其和  $B'C'$  重合。由于  $\square ABCO$  与  $\square AB'C'O$  全等, 可以得到:

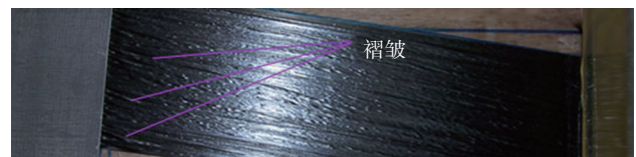
$$\theta = 2\alpha \quad (2)$$

该试验方法既保证是纤维间的距离恒定, 又能使单向带预浸料受力均匀, 从而避免局部产生严重缺陷。

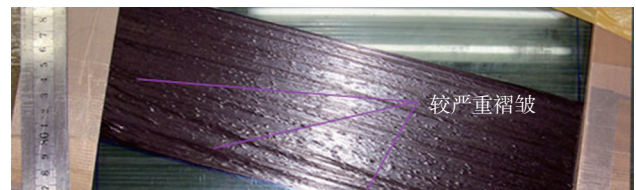
该方法的实际操作过程如图 4 所示: 首先在试验平台上用记号笔画好  $\square ABCO$  与  $\square AB'C'O$ ; 然后在试验



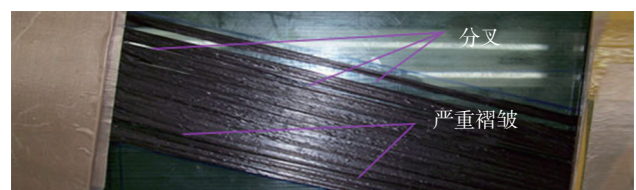
(a)  $\theta = 8^\circ$



(b)  $\theta = 10^\circ$



(c)  $\theta = 12^\circ$



(d)  $\theta = 14^\circ$

图5 各  $\theta$  角度变形缺陷

Fig.5 Defects of various deformation angles

平台上贴 A005,其右边界与 AO 边对齐,这主要为了防止双面胶粘在试验平台上不容易清除;接着在 A005 上贴好双面胶,其右边界也与 AO 边对齐;再把单向带预浸料平整铺放在试验平台上,使其两边刚好与 AB 边和 OC 边对齐。由于 AO 边左边贴有双面胶,等同于预浸料 AO 边被固定;用双面胶沿着 BC 边将预浸料固定在钢板上。保持预浸料均匀受力,顺时针缓慢移动钢板,使 BC 边与 B'C' 重合,在试验过程中观察单向带预浸料是否产生缺陷。

### 2.3 试验方案

#### 2.3.1 变形角度警告值及限制值定义

由于国内外在这方面研究甚少,缺乏参考文献,所以对单向带预浸料变形角度具体范围没有定性的认识,因此设计了初步探索试验。初步确定单向带预浸料变

表1 因素—水平表

水平	因素		
	A 单向预浸料的长度 /mm	B 单向预浸料的宽度 /mm	C 含胶量 /%
1	300	50	30.1
2	600	100	35.1
3	900	150	40.3

表2 L<sub>9</sub>(3<sup>3</sup>)正交表

编号	因素		
	A 单向预浸料的长度 /mm	B 单向预浸料的宽度 /mm	C 含胶量 /%
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

表3 素与变形角度警告值与限制值的协同效应

试验号	A 单向带预浸料的长度 /mm	B 单向预浸料的宽度 /mm	C 含胶量 /%	变形角度警告值与限制值 / (°)	
1	300	50	30.1	12/16	
2	300	100	35.1	9/13	
3	300	150	40.3	10/14	
4	600	50	35.1	10/14	
5	600	100	40.3	10/14	
6	600	150	30.1	7/11	
7	900	50	40.3	11/15	
8	900	100	30.1	9/13	
9	900	150	35.1	9/13	
变形角度警告值与限制值极差分析	I II III 极差	31/43 27/39 29/41 4/4	33/45 28/40 26/38 7/7	28/40 28/40 31/43 3/3	采用极差分析,得出各因素的影响程度为: B>A>C 最优方案:A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>

形角度的范围。

试验方案:选用含胶量为 35.1% 的单向带预浸料 (T700/QY8911), AB 的长度为 300mm,宽度为 100mm,  $\theta$  分别为:2°、4°、6°、8°、10°、12°、14° 进行试验。从结果可以看出,当  $\theta$  为 2°、4°、6° 时,变形过程中单向带预浸料不产生缺陷;当  $\theta$  为 8° 时,变形过程中会产生微小皱褶,如图 5 (a) 所示;当  $\theta$  为 10° 时,变形过程中会产生皱褶,如图 5 (b) 所示;当  $\theta$  为 12° 时,变形过程中会产生较严重的皱褶,如图 5 (c) 所示;当  $\theta$  为 14° 时,变形过程中会产生严重皱褶,有些局部会分叉,如图 5 (d) 所示。

对比上述不同  $\theta$  角的单向带预浸料变形结果,可以看出随着  $\theta$  值的增大,单向预浸料越容易产生皱褶、分叉等缺陷。当  $\theta=8^\circ$  时,单向带预浸料变形过程中会产生微小的皱褶,这种微小的缺陷在实际零件铺贴过程中也存在,符合工程技术要求,因此,将这种情况所对应的  $\theta$  角称为该单向带预浸料变形角度警告值。当  $\theta=12^\circ$  时,单向带预浸料变形过程中会产生严重的缺陷,这些缺陷对零件力学性能产生较大影响,是实际铺贴过程中不可接受的缺陷,因此,将这种情况所对应的  $\theta$  角称为该单向带预浸料变形角度限制值。

#### 2.3.2 变形角度警告值与限制值的测定及其影响因素

单向带预浸料变形角度警告值与限制值可能与其长度、宽度以及黏度有关系,然而单向带预浸料黏度不容易表征,但是在相同的条件下其含胶量直接决定其黏度的大小。因此,为了确定变形角度警告值与限制值的影响因素,以单向带预浸料的长度( $\square ABCO$  中 AB 的长度)、宽度( $\square ABCO$  中 AB 与 CO 的距离)、含胶量为 3 个因素,每个因素各取 3 个水平,进行正交试验,因素与水平如表 1 所示。

按照表 1 的 3 因素 3 水平设计 L<sub>9</sub> (3<sup>3</sup>) 正交试验,如表 2,并以变形角度警告值与限制值作为结果。按上述的正交排列进行试验:每组试验从  $\theta=6^\circ$  作为起点,以 1° 的速度递增,直至得到变形角度警告值与限制值。

### 2.4 结果与讨论

上述试验得出各组单向带预浸料的变形角度警告值与限制值,并且分析各因素与变形角度警告值与限制值的协同效应,如表 3 所示。

从试验结果的极差分析可以得到:单向带预浸料的宽度对变形角度警告值与限制值的影响最大,其次是长度对其的影

(下转第 73 页)

预浸材料相比,该产品(Arovex™型碳纳米管增强碳纤维预浸料)在硬度和强度上分别有30%到50%的提高。最近,Zyvec公司又推出了Epovex和Nanosolve2种产品。Epovex是一种碳纳米管增强粘结剂,而Nanosolve则是一种分散剂,用以帮助使用者将碳纳米管(CNTs)与水基或溶剂基聚合物系统结合为一体。

LRV-17是在无人水面舰艇Piranha 2010年亮相后推出的第一艘纳米材料制成的载人舰艇,该舰艇仅需2名操作从员,最多可容纳4名非操作人员达5天以上,图2(b)所示。由于采用了纳米技术公司Zyvec Technologies的Arovex™的碳纳米管(CNTs)增强碳纤维预浸料,导致燃油使用率提高,使得该舰艇行驶里程达1500海里,超过同等规模舰艇行驶范围3倍。

Fulcrum公司宣布与法国阿科玛公司合作开发高强度碳纳米管增强复合材料部件。该项目采用纤维化学改性法,目标是将碳纳米管嫁接到二维或三维织布上,如碳纤维织布。这种增强织物将用于制造航空和其他工业领域使用的复合材料部件。

美国麻省理工学院科学家最新研究出一种用碳纳米管“装订”航空材料的技术。该技术采用物理方法将碳纳米管同时与树脂及纤维复合。即在研究过程中使碳纳米管与碳纤维层垂直排列,然后对碳纤维层之间的聚合物粘胶进行加热,液化后的聚合物会将碳纳米管吸收进去,起到“装订”碳纤维层的作用。碳纳米管直径只有几nm,是碳纤维直径的千分之一,在加热后会被每层之间的聚合物粘胶吸收,所以不会破坏碳纤维,而只是填充纤维之间的空隙,使材料变得更坚固。用于“装订”的碳纳米管重量只占复合材料总重的1%,复合材料的成本也只增加百分之几,但强度和抗雷电能力却大大增强。

### 3 结束语

与传统纤维增强树脂基复合材料相比,碳纳米管和连续碳纤维增强复合材料具有更好的性能。但目前还没有一种完善的方法来制备碳纳米管和连续碳纤维增强复合材料。如果能有效解决碳纳米管在复合材料中均匀分散、定向排列及碳纳米管、碳纤维和树脂基体三者间的界面强度低的问题,其预计能更好地满足航空、航天领域对材料轻质、高强、多功能化等方面的需求。

#### 参考文献

- [1] Iijim A S. Helical microtubels of graphitic carbon .Nature, 1991(354): 56-58.
- [2] 邱军. 碳纤维/聚合物复合材料纳米强韧化. 第17届全国复合材料学术会议论文,北京,2012:1029-1038.
- [3] 赵东林,乔仁海,沈曾民. 碳纳米管与连续碳纤维增强树

脂基复合材料的制备及其力学性能研究. 新型炭材料,2001,16(1): 1180-1184.

- [4] 隋刚,梁胜彪,李卓,等. 性碳纳米管增强体对T1000碳纤维复合材料性能的影响. 复合材料性能测试与检测,8:736-741.
- [5] 唐玉生,顾军渭. 碳纳米管改性双马来酞亚胺/碳纤维复合材料力学性能研究. 塑料工业,2007,35(11): 53-56,66.
- [6] Thostenson E T, Li W Z, Ren Z F, et al. Carbon nanotube/ carbon fiber hybrid multiscale composites. Journal of Applied Physics,2002, 91: 6034- 6037.
- [7] Vinodp V, Cao A Y, Li X S, et al. Multifunctional composites using reinforced lamina with carbon-nanotube forests, Nature,2006, 5: 457-462.
- [8] Alan M C, Geoff C M, Hou T N, et al. Carbon nanotube networks by chemical vapor deposition. Applied Physical Letters, 2003.82( 5) :817-819.
- [9] Garcia E J, Wardle B L, Hart A J. Joining prepreg composite interfaces with aligned carbon nanotubes. Composites: Part A ,2008, 39(6):1065-1070.
- [10] 刘刚,胡晓兰,张朋,等. 碳纳米管膜层间改性碳纤维/环氧树脂复合材料. 高分子学报,2013(10):1334-1340.
- [11] 贾晓龙,柳柏杨,李刚,等. 碳纤维/聚合物复合材料纳米强韧化. 第17届全国复合材料学术会议北京,2012:1029-1038.

(责编 圭一)

(上接第70页)

响比较大,含胶量对其的影响比较小。

### 3 结论

单向带预浸料在不可展曲面上铺贴时会发生变形,当变形角度超过变形角度警告值时会产生实际生产能接受的微小铺贴缺陷;当变形角度超过变形角度限制值时会产生实际生产不可接受的严重缺陷;单向带预浸料的宽度对变形角度警告值与限制值的影响最大,其次是长度对其的影响比较大,含胶量对其的影响比较小;含胶量为30%~40%、长度为300mm~900mm、幅宽为50mm~150mm的单向预浸料(T700/QY8911)变形角度警告值大概为7°~12°,限制值大概为11°~16°。

#### 参考文献

- [1] 匡载平,戴棣,王文贵. 单向预浸料在不可展曲面上的铺覆制约规律. 第15届复合材料会议论文集,525-555.
- [2] Kisilak D. A new method of evaluating spherical fabric deformation . Textile Research Journal,1999,69(12):908-913.
- [3] Baillargeon Y, Vu-Khanh T. Prediction of fiber orientation and microstructure of woven fabric composites after forming. Composite Structures, 2001, 52 :475-481.
- [4] Bickerton S, Simacek P. Investigation of draping and its effects on the mold filling process during manufacturing of a compound curved composite part. Composites: Part A, 1997, 28A :801-861.
- [5] Bernardon Ed. Fiber SIM, CAD Integrated Software Tools for Composite Manufacturing and Design. SAMPE Journal, 1998, 34(4):34-39.
- [6] Timothy G. Advanced composites manufacturing. John Wiley & Sons, Inc. 1997.

(责编 亿霖)