

# 热压罐成型变厚度层板缺陷研究

邓火英<sup>1,2</sup> 顾轶卓<sup>1</sup> 李敏<sup>1</sup> 张佐光<sup>1</sup>

(1 北京航空航天大学材料科学与工程学院,北京 100083)

(2 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 以 S - 2 玻璃纤维 / 环氧 648 变厚度层板为研究对象,采用热压罐工艺成型,考察了不同铺层方式和阶梯宽度下缺陷的形成情况。研究表明,由于厚度梯度的存在,层板中容易产生纤维分布不均、富树脂、孔隙和分层缺陷,这与树脂的二维流动、纤维的滑移和结构的不对称性有关,铺层方式对各种缺陷影响显著。变厚度层板成型过程中倾角减小使得尺寸难以预测和控制,成型过程中应尽量避免树脂的流动。

**关键词** 复合材料,热压罐成型,变厚度层板,缺陷

## Defects of Variable Thickness Laminates in Autoclave Process

Deng Huoying<sup>1,2</sup> Gu Yizhuo<sup>1</sup> Li Min<sup>1</sup> Zhang Zuoguang<sup>1</sup>

(1 School of Materials Science & Engineering, Beihang University, Beijing 100083)

(2 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** The variable thickness laminates of S - 2 glass/epoxy 648 in different types of lay-up and different gradients are prepared with autoclave process, and the forming mechanisms of defects in fabrication are analyzed. It indicates that fiber volume fraction nonuniformity, rich resin, void and delamination are easily formed in the area of variable thickness, which are connected with the two-dimensional resin flow, fiber slipping and the structure asymmetry, and the type of lay-up have significant effects on these defects. The dimension of variable thickness laminates is hard to forecast and control due to the decreasing of slope angle, so resin flow should be avoided during processing.

**Key words** Composites, Autoclave process, Variable thickness laminates, Defects

### 1 引言

层压结构中,经常有从厚度较大到厚度较小的过渡区,即变厚度结构。变厚度层合板是壁板的主要形式<sup>[1]</sup>,在航空航天领域应用广泛,由于厚度的梯度存在,其结构与等厚平板有所区别,导致其成型过程比较复杂,容易产生各种缺陷,严重影响其性能及使用的可靠性。

异形结构的成型过程及其对性能的影响已受到国外一些研究者的重视,针对 L 形构件的较多, Najji<sup>[2-3]</sup>研究了固化制度对 L 形构件厚度和纤维分布不均的影响, Hubert<sup>[4-6]</sup>和 Li Min<sup>[7]</sup>模拟了固化后 L 形构件的密实和变形情况,研究了材料的物性参数与构件参数对纤维密实的影响,指出了研究渗流与剪切流耦合作用的重要性,通过实验分析了缺陷与工艺条件

之间的关系。这些研究偏重于数值模拟方面,在实验方面系统性不足,而且纤维密实与缺陷形成之间的内在联系也较少涉及,对变厚度层合板的缺陷研究未见报道。本文采用热压罐成型,考察变厚度结构在成型过程中所产生的主要缺陷类型以及缺陷的形成机制,揭示该结构的成型特点以及缺陷情况,并为该结构在以后的应用中缺陷的预测和控制以及工艺参数的选取提供一定的指导。

### 2 实验

#### 2.1 原材料及设备

原材料:648环氧树脂,无锡树脂厂;固化剂三氟化硼单乙胺,北京长阳振兴化工有限公司;S - 2 玻璃纤维,南京玻璃纤维研究设计院。

设备:排布机,北京航空制造工程研究所;热压

收稿日期:2006 - 09 - 30

作者简介:邓火英,1981年出生,硕士,主要从事聚合物基复合材料方面的研究

宇航材料工艺 2007年 第6期

— 65 —

罐, FIG - YB; 光学数码金相显微镜, Olympus BX51M; 图像采集系统, Sisc A.S.

## 2.2 实验

### 2.2.1 层板的成型

变厚度层合板的宽度为 15 cm, 阶梯宽度选取了 10 和 5 mm 两种, 具体铺层尺寸如表 1 所示。

表 1 变厚度层合板的铺层尺寸

铺层次序 / 层	铺层长度 / mm	
	阶梯宽度 10 mm	阶梯宽度 5 mm
1 ~ 4	100	125
5 ~ 8	110	130
9 ~ 10	120	135
11 ~ 12	130	140
13 ~ 20	150	150
21 ~ 22	110	130
23 ~ 24	120	135
25 ~ 28	130	140
29 ~ 32	150	150

将 S - 2 玻璃纤维 / 648 环氧树脂预浸料按 [0]、[90]、[0 / ±45 / 90 / 90 / ∓45 / 0] 铺层方式进行铺层, 下文一律分别用 0 铺层、90 铺层、准各向同性代表, 然后在热压罐中成型, 升温历程为: 从室温加热到 90 并恒温 0.5 h, 再升到 180 并恒温 1 h, 升温速率约为 1 / min, 然后自然冷却。成型前加真空 0.1 MPa, 当热压体系达到 130 时再加气压 0.5 MPa, 并保持恒定至固化结束。

### 2.2.2 试样的制备与测试

固化成型的层板经过切割、封样、磨光、抛光、浸蚀制得金相试样, 在数码光学显微镜下观察变厚区以及附近区域各种缺陷的形貌、形成位置、大小和分布情况, 孔隙率用烧蚀密度法测定。

在层板 x 方向 (长度方向) 厚度、孔隙率和纤维体积分数的取样位置如图 1 所示, 考察厚度梯度对层板尺寸、孔隙率和纤维体积分数分布的影响。

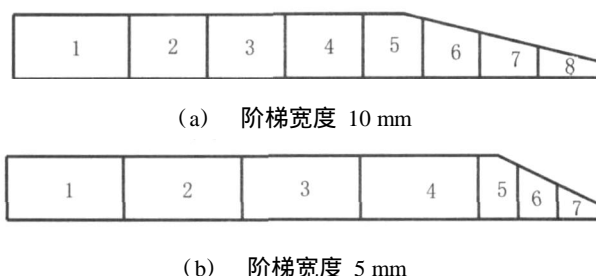


图 1 厚度、孔隙率和纤维体积分数测定的取样示意图

Fig 1 Sketch map of sampling for measuring thickness, void content and volume fraction of fiber

## 3 结果与讨论

### 3.1 变厚度层板成型过程分析

厚度的不均一使变厚度层板在热压成型过程中与等厚平板有较大的不同, 首先树脂更容易在层板面内流动, 这是由于在变厚区树脂压力梯度使得树脂可以沿厚度方向和层板方向发生二维流动, 导致梯度区的树脂压力低于平板区, 树脂有由平板区向梯度区流动的驱动力, 图 2 为变厚度层板在成型过程中树脂流动方向示意图。同时外压的作用使得梯度区纤维可能发生滑移 (剪切变形), 树脂面内流动与纤维的滑移导致层板在成型前后倾角的变化, 纤维分布不均等缺陷的产生, 另外由于变厚度构件在结构上的不对称性, 容易引起应力集中和残余应力从而形成分层。

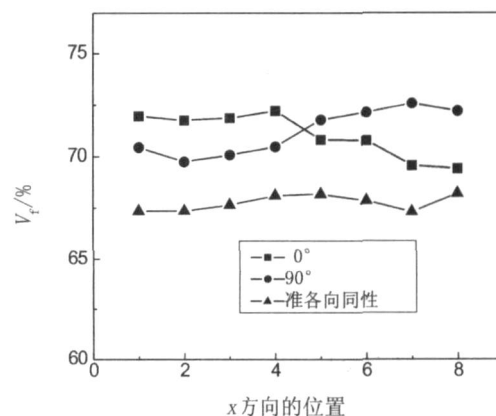


图 2 变厚度层板成型过程中树脂流动示意图  
Fig 2 Sketch map of resin flow during processing in variable thickness laminates

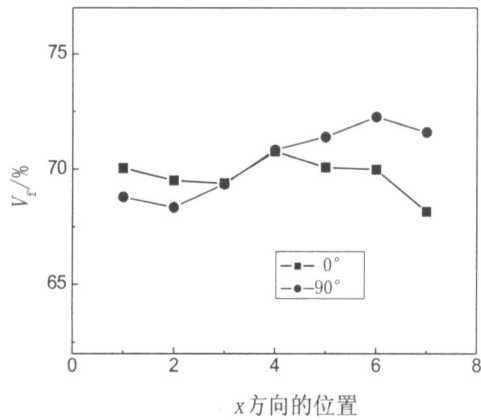
### 3.2 铺层方式的影响

纤维铺层方式不同会导致纤维的三维网络结构发生改变, 从而影响纤维层的压缩特性, 树脂的流动规律, 特别是对于变厚度这种非对称结构, 铺层方式的改变将显著影响其密实过程和缺陷的产生。层板最厚处为 32 层, 最薄处为 8 层, 层板成型后的纤维体积分数的分布如图 3。

由图 3 可见, 0 铺层变厚区纤维体积分数低于平板区, 90 铺层则相反, 这是由于 0 铺层的面内渗透率 (沿纤维方向) 明显大于厚度方向, 树脂向变厚区流动, 而 90 铺层面内渗透率与厚度方向相当, 树脂向变厚区流动的阻碍性比较大, 主要沿厚度方向流动, 而变厚区树脂是一种二维流动。准各向同性介于二者之间, 平板区与变厚区纤维含量没有显示出明显的差异。



(a) 阶梯宽度 10 mm



(b) 阶梯宽度 5 mm

图 3 铺层方式对纤维分布的影响

Fig 3 Influence of type of lay-up on distribution of fiber

变厚度层板在成型过程中倾角有可能发生变化,直接影响着层板的最终尺寸,倾角的改变主要与加压方式有关,表 2 列出了层板成型前后的倾角,  $\theta_0$  为层板成型前的倾角。由表 2 可见,不同铺层方式的变厚度层板成型后倾角都有一定的减小,这是由于梯度区的纤维在外压作用下容易向厚度较薄处发生滑移,树脂也有可能沿面内向梯度区流动,而热压罐成型时在层板表面是一些软的辅助材料,不能很好的限制层板的尺寸,导致成型后倾角的减小。这使得变厚度层板的尺寸很难预测和控制,所以在成型过程中应尽量避免树脂的流动,可以采用预吸胶工艺。

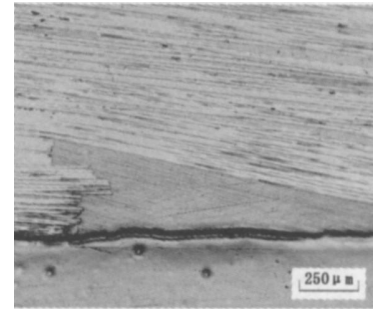
表 2 变厚度层板热压罐成型后的倾角

Tab 2 Slope angle of variable thickness laminae after autoclave process

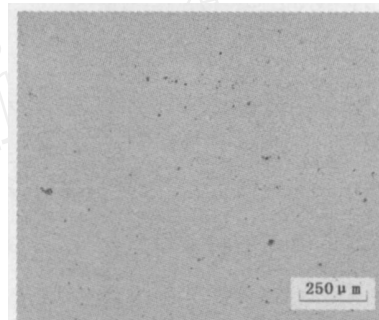
铺层方式	层板成型后倾角 / (°)	
	( $\theta_0 = 3.2^\circ$ )	( $\theta_0 = 6.4^\circ$ )
0°	2.08	4.30
90°	1.99	4.04
准各向同性	2.22	

由变厚度层板的光学显微照片可以发现(图 4),在梯度区的铺层长度变化处往往容易产生富树脂,0°铺层最明显,这也是该铺层梯度区纤维体积分数小的原因之一。在铺层的长短搭接处,存在纤维很难填充到的一些三角区,当温度升高,树脂因黏度降低而通过流动将此三角区填充,但纤维能否通过滑移而填充这些三角区,取决于铺层方式、纤维的滑移能力、外加压力的大小等众多因素,0°铺层在厚度变化方向是沿

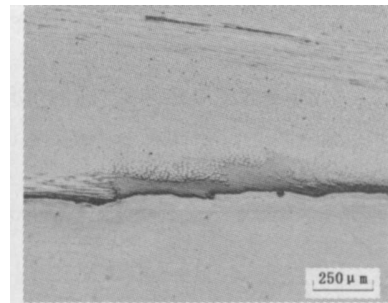
纤维方向,纤维难以滑移,而 90°铺层是垂直纤维方向,纤维容易通过滑移而发生重排将这些三角区填充,所以极少富树脂,可以通过铺层设计来尽量减小富树脂的出现。



(a) 0°



(b) 90°

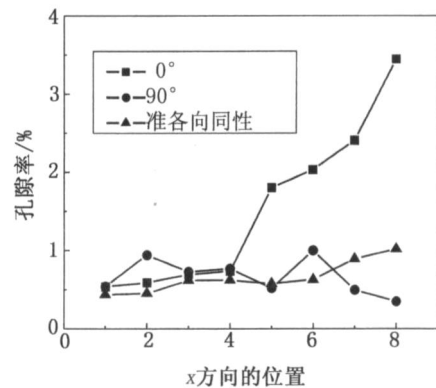


(c) 准各向同性

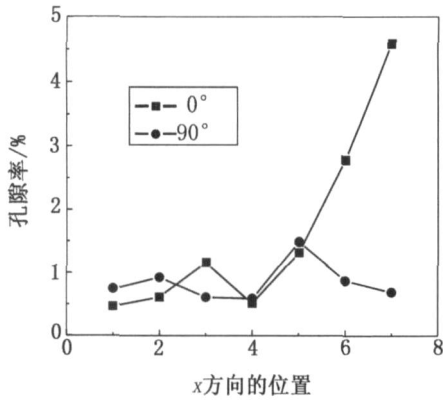
图 4 铺层方式对富树脂的影响

Fig 4 Influence of type of lay-up on rich resin

从孔隙率来看(图 5),只有 0°铺层梯度区的孔隙率比较大,这可能是由于 0°铺层在铺层搭接处的树脂富余最明显,所以孔隙也最容易在富树脂区聚集。



(a) 阶梯宽度 10 mm



(b) 阶梯宽度 5 mm

图 5 铺层方式对孔隙的影响

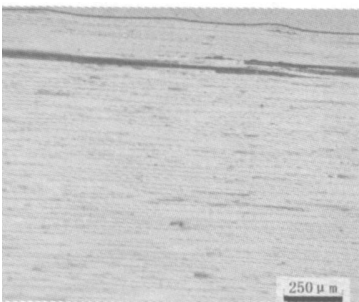
Fig 5 Influence of type of lay-up on void

通过光学金相显微镜观察还发现层板中普遍存在分层现象,表 3详细列出了变厚度层板的分层程度以及分层的位置,图 6为变厚区分层的显微照片。由于变厚度构件在结构上的不对称性,在变厚区铺层长短不同,互相搭接,导致纤维的不连续,层板内部形成复杂的残余应力分布,而且容易引起应力集中,形成分层。

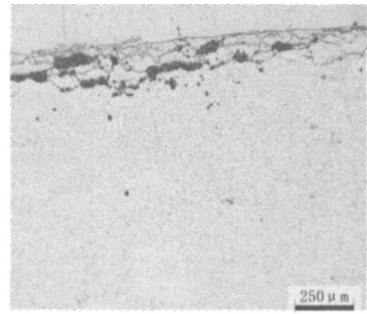
表 3 热压罐成型变厚度层板分层的情况

Tab 3 Delamination of variable thickness laminates after autoclave process

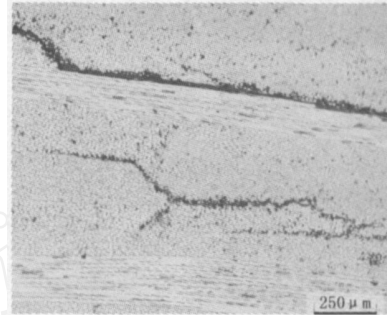
铺层方式	阶梯宽度/mm	分层程度	分层位置
0°	10	轻微	沿纤维方向铺层搭接处上方、上表面
	5	轻微	上表面
90°	10	严重	上表面碎裂、下表面
	5	严重	上表面碎裂
准各向同性	10	严重	(1) ±45°、90° 沿厚度方向 (2)铺层界面,主要在 0°与 ±45°之间 (3)90°铺层内沿 x方向 (4)铺层短与长搭接处



(a) 0°



(b) 90°



(c) 准各向同性

图 6 热压罐成型变厚度层板的分层照片

Fig 6 Delamination micrograph of variable thickness laminates after autoclave process

从表 3还可以看出,90°层板的分层情况比较特殊,孔隙容易在表面局部富集,这可能与热压罐成型时的真空压力有关,真空压力的作用使孔隙排出的路径通畅,孔隙容易在层板表面富集,富集的孔隙在残余应力或者试样切割时外力的作用下相互连接形成狭长状的裂缝。

#### 4 结论

(1)变厚度层板在厚度的梯度区以及附近区域容易产生纤维分布不均、富树脂、孔隙和分层缺陷,这与树脂的二维流动、纤维的滑移和结构的不对称性有关,铺层方式对这些缺陷的产生也有着显著的影响,最容易产生富树脂的是 0°铺层,90°铺层最容易避免富树脂的出现,在实验范围内,90°和准各向同性铺层分层比较明显。

(2)0°铺层由于面内渗透率明显大于厚度方向,变厚区的纤维体积分数低于平板区;90°铺层面内渗透率与厚度方向相当,变厚区的纤维体积分数高于平板区。

(3)树脂的二维流动与梯度区纤维的滑移使得变厚度层板成型后倾角减小,尺寸难以预测和控制,在成型过程中应尽量避免树脂的流动。

(4)在实验范围内,热压罐成型的变厚度层板孔隙一般在层板的表面局部富集,这可能与热压罐成型时真空压力的作用有关。

#### 参考文献

1 赵渠森. 先进复合材料手册. 北京:机械工业出版社, 2003: 747 ~ 748

2 Naji Malak I, Hoa Suong V. Curing of thick angle-bend the moset composite part: curing cycle effect on thickness variation and fiber volume fraction. Journal of Reinforced Plastic and Composites, 1999; 18(8): 702 ~ 723

3 Naji Malak I, Hoa Suong V. Curing of thick angle-bend the moset composite part: curing process modification for uniform thickness and uniform fiber volume fraction distribution. Journal of Composites Materials, 2000; 34(20): 1710 ~ 1760

4 Hubert Pascal, Vaziri Reza, Poursartip Anoush. A two-dimensional flow model for the process simulation of complex shape composite laminates. In: Int Numerical Methods in Engineering, 1999; 44: 1 ~ 26

5 Hubert Pascal, Poursartip Anoush. A review of flow and compaction modeling relevant to the moset matrix laminate processing. Reinforced Plastics and Composites, 1998; 17(4): 286 ~ 318

6 Hubert Pascal, Poursartip Anoush. Aspects of the compaction of composite angle laminates: an experimental investigation. Journal of Composite Materials, 2001; 35(1): 2 ~ 26

7 Li Min, L Charles, III Tucker. Modeling and simulation of two-dimensional consolidation for the moset matrix composites. Composites, Part A: applied science and manufacturing, 2002; 33: 877 ~ 892

(编辑 任涛)

www.cnki.net