复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第 26 卷 第 5 期 10 月 2009 年
Vol. 26 No. 5 October 2009

文章编号：1000-3851(2009)05-0014-06

变厚度复合材料热压罐工艺层板厚度控制的实验研究

马晓东，孙志杰，顾轶卓*，辛朝波，李 敏，张佐光
（北京航空航天大学 材料科学与工程学院 空天材料与服役教育部重点实验室，北京 100191）

摘 要： 针对 2 种碳纤维织物/环氧预浸料，采用热压罐工艺在不同条件下制备了变厚度层板，并通过层板内部形貌、层板厚度、纤维含量、吸胶量、织物渗透率的测试分析，研究了变厚度层板的密实过程和纤维分布的影响因素。结果表明：密实过程中树脂的二维流动导致 2 种织物变厚度层板厚板区的纤维含量高于薄板区；G0827 单向织物的面内渗透率与厚度方向渗透率比值大于 G0803 缎纹织物，造成 G0827 织物变厚度层板的纤维分布不均匀性更大；无吸胶材料的条件下层板内纤维分布均匀，说明吸胶材料内树脂的面内流动对层板的纤维分布有很大影响。

关键词： 复合材料；热压罐工艺；变厚度层板；层板密实
中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

Experimental analysis on thickness control of variable thickness composite laminates during autoclave process

MA Xiaodong, SUN Zhijie, GU Yizhuo*, XIN Chaobo, LI Min, ZHANG Zuoguang
(Key Laboratory of Aerospace Materials and Performance (Ministry of Education), School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Variable thickness laminates under different conditions were prepared with autoclave process for two types of carbon fiber fabric/epoxy prepregs. The consolidating process and the influencing factors of fiber distribution for the variable thickness laminates were investigated by measuring the structure of fabric in cured laminate, laminate thickness, fiber content, bleeding quantity and permeability of fabrics. The results showed that the fiber content in thick area was higher than that in thin area for cured laminates due to the two dimensional resin flow. The ratio of in-plane permeability to the permeability along thickness direction of G0827 unidirectional fabric was larger than that of G0803 satin fabric, resulting in that the fiber distribution in G0827 variable thickness laminate was more uneven. Fiber distribution without bleeder was uniform and it indicates that the two dimensional resin flow in the bleeder influences the fiber distribution remarkably.

Keywords: composites; autoclave process; variable thickness laminate; consolidation

变厚度是复合材料构件重要的几何要素，是复合材料设计和制造中的重要参量。目前针对变厚度层板的力学性能及其有限元模拟方面的研究较多[1-2]，而其几何结构特点除了影响力学性能外，对工艺过程也有明显的影响。与等厚度层板相比，变厚度层板密实过程具有特殊性。研究发现[3]，变厚度层板密实过程中存在树脂二维流动和纤维滑移现象，并容易出现纤维分布不均、富树脂区和分层等缺陷，并造成其厚度不易控制，尤其难以同时保证纤维在厚板区与薄板区的分布均匀性；工程中发现对于织物预浸料，此类现象更加明显。复合材料变厚度层板密实过程的控制是决定其成型质量和尺寸精度的关键问题，因此，变厚度层板的密实规律是复合材料制造工艺中的重要研究内容。

目前对于层板密实规律的研究多集中于等厚度层板，主要有 2 种理论模型：(1) Loos 和 Springer[4] 提出的波浪式密实模型(Sequential compaction model)，认为在整个热压过程中树脂承担了全部外

收稿日期： 2008-09-11；**收修改稿日期：** 2008-11-12
基金项目： 国家 863 项目(2006AA03Z556)
通讯作者： 顾轶卓，博士，主要从事树脂基复合材料方面的研究工作 E-mail: benniegu@buaa.edu.cn

压而纤维层不承担压力且没有相互作用；(2) Dave 和 Gutowski 等人[5-7]提出的海绵式密实模型(Squeezed sponge model)，认为外压由树脂和纤维共同承担，并遵循土木工程中的有效应力原理。变厚度层板由于其密实规律的特殊性，也开始受到关注。

本文中采用热压罐工艺制备了 2 种碳纤维/环氧织物预浸料的变厚度层板，实验分析了变厚度层板的密实过程，研究了渗透率、吸胶工艺、模具等因素对纤维分布的影响规律。研究结果对变厚度层板密实质量的控制有着重要的指导意义。

1 实 验

1.1 实验原材料与设备

G0803 碳纤维缎纹布/环氧 914(美国 Hexcel 公司)，树脂含量 42%(质量分数)；G0827 碳纤维单向布/环氧 914(美国 Hexcel 公司)，经向为碳纤维，纬向有少量玻璃纤维，树脂含量 42%(质量分数)；橡胶软模(美国 Airtech 公司)；吸胶布(哈尔滨飞机工业集团有限责任公司)；FJG－YB 热压罐；Olympus BX51M 光学数码金相显微镜；自制纤维层渗透率测试模具。

1.2 实验方法

1.2.1 层板的制备与测试

采用热压罐成型工艺分别以 2 种不同的织物预浸料制备变厚度层板。设计非等厚层板尺寸为 150 mm×150 mm，其中厚板区、薄板区和过渡区的宽度分别为 60 mm、60 mm 和 30 mm。本文中设计厚板区与薄板区厚度差为 2 mm，已知 G0803 预浸料和 G0827 预浸料的单层厚度理论值分别为 0.285 mm和 0.166 mm，故设计铺层层数如图 1 所示，插层数分别为 1 和 2，由层数及插层数确定 2 种预浸料在过渡区铺层的长度差分别为 5mm 和 6mm。G0827 体系采用正交[0/90]铺层方式，G0803 体系采用单向铺层方式。

采用不同的模具形式、吸胶工艺成型变厚度层板，并考察了这些因素对变厚度层板密实的影响。模具形式分为单面模具、双面模具，如图 2 中所示。双面模具是指在铺层表面放置与此表面相配合的橡胶软模辅助成型；单面模具则不使用橡胶软模。

实验中采用吸胶工艺和无吸胶材料的零吸胶工艺制备变厚度层板。吸胶工艺中在铺层上表面铺放单层吸胶布以吸取多余树脂；零吸胶工艺则无吸胶布，但隔离材料会吸取少量树脂。固化工艺制度如图 3 所示。

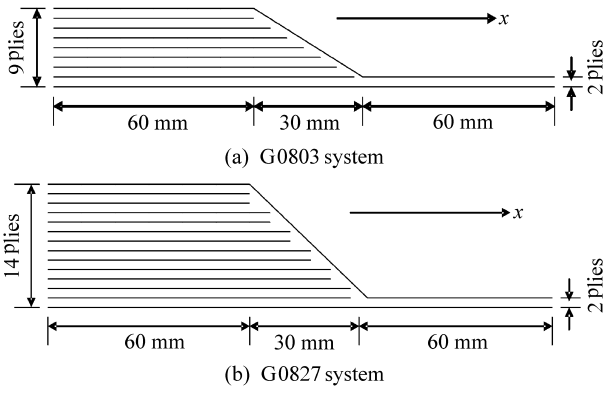
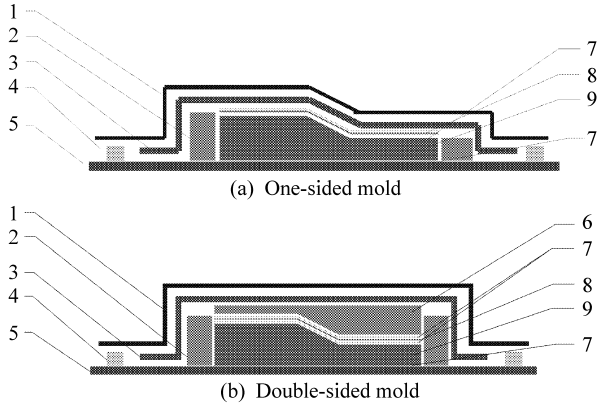


图 1 变厚度层板铺层示意图

Fig. 1 Sketch map of lay-up type for variable thickness composite laminate



1－Vacuum bag；2－Dam；3－Breather；4－Seal；5－Steel plate；6－Rubber mold；7－Nonporous ply；8－Bleeder；9－Prepreg stack

图 2 热压罐工艺封装示意图

Fig. 2 Schematic diagram of encapsulation in autoclave process

固化后变厚度层板的厚度测量位置及其显微观察取样位置如图 4 所示。沿 x 方向依次测量厚度，同时取样进行显微观察，观察方向为垂直于图 4 所示的层板侧面方向。层板固化后，对吸胶布的吸胶量进行测量。把吸胶布分别按厚板区、过渡区和薄板区裁开并称重，与吸胶前进行对比，计算出对应区域的吸胶量，结合该区域的面积和铺层数得到单位面积单层预浸料的吸胶量。

在孔隙、分层缺陷可以忽略的情况下，层板纤维体积分数的计算方法[8]如下式：

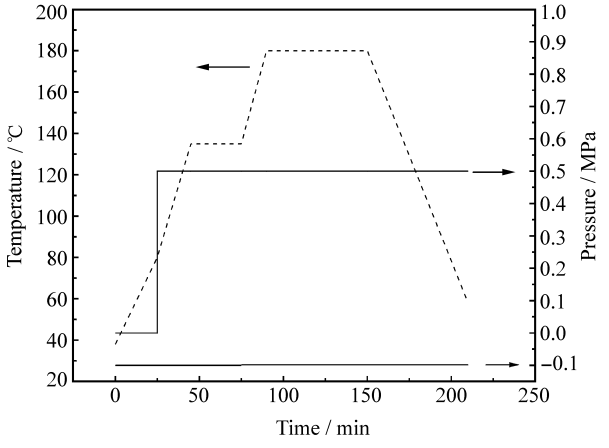


图 3　变厚度层板固化工艺制度

Fig. 3　Cure cycle for variable thickness composite laminate

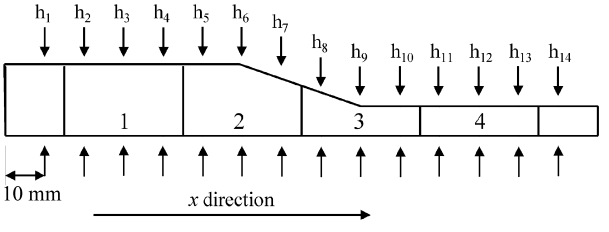


图 4　厚度测量及显微观察取样位置示意图

Fig. 4　Positions of thickness measurement and sampling for micrographs

$$V_f = \frac{n\rho_a}{H\rho_f} \tag{1}$$

式中：n 为铺层层数；H 为层板总厚度；ρ_a 和 ρ_f 分别为纤维织物的纤维面密度和纤维的密度。已知 G0803 织物和 G0827 织物的纤维面密度分别为 286 g/m^2 和 161 g/m^2，纤维密度为 1.76 g/cm^3。

1.2.2　渗透率的测试

为了分析纤维织物的渗透率对密实过程的影响，采用自制的纤维层渗透率测试装置测定了 2 种织物的 z 向(厚度方向)饱和渗透率和面内饱和渗透率。实验中使用的模具是针对热压成型中树脂在纤维层中的流动特点设计的，可以对同一个铺层完成 z 向和面内 2 个方向饱和渗透率的测量。实验中测定一定压差下已知黏度液体通过纤维层的体积流速，根据达西定律就可以计算出一定纤维体积分数下的饱和渗透率[9]。整个测试在室温下进行，测试液体采用大豆油，分别测试了不同纤维体积分数下单向铺层的 G0803 织物和正交铺层的 G0827 织物的面内渗透率与 z 向渗透率。

2　结果与讨论

2.1　变厚度层板密实过程分析

变厚度层板与等厚度层板在结构上存在差异，导致其密实过程与等厚度层板有很大的不同。变厚度层板存在薄板区、厚板区和过渡区，过渡区同时会影响到薄板区域和厚板区域的密实。

当面内尺寸远大于厚度尺寸且四边受挡条密封时，可以认为等厚度层板在成型过程中只存在厚度方向的流动。对于变厚度层板，由于厚度较薄处树脂流动路径短、树脂压力梯度大，因此树脂流动速度较快，树脂压力降大，这样厚度较大处的树脂压力会大于厚度较薄处的树脂压力，所形成的压力梯度将使树脂沿面内 x 方向发生流动，如图 5 所示。这种面内流动一方面促进了厚度较大处的纤维密实，另一方面也延缓了厚度较小处的纤维密实。

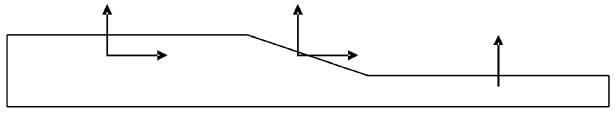
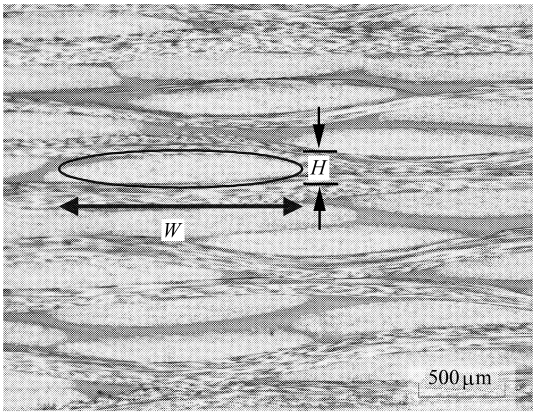


图 5　变厚度层板二维流动示意图

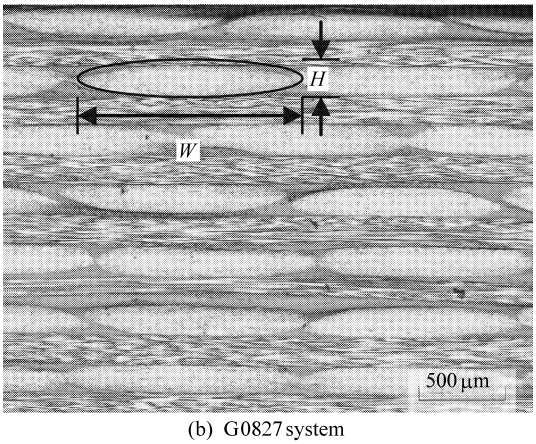
Fig. 5　Two dimensional flow in variable thickness laminates

此外，变厚区长度不同的纤维层之间形成了纤维的不连续区域，一方面容易形成富树脂区，另一方面在压力的作用下纤维容易发生滑移，从而改变变厚区的纤维分布。因此，树脂的二维流动和纤维的不连续区域是密实过程中变厚度层板区别于等厚度层板的 2 个主要特征，容易引起固化层板厚度分布和纤维分布不均等现象产生[3]。

图 6 为 2 种织物预浸料固化后层板内部的显微照片。对于采用织物预浸料制备的变厚度层板，由于外加压力的作用，纤维织物的丝束在固化过程中发生变形，固化后丝束近似呈椭圆形。采用 Photoshop 软件的测量工具对椭圆形丝束的宽度 H 和长度 W 进行分类统计，如图 6 中所示，得到不同条件下层板厚板区和过渡区椭圆形丝束的几何参数，结果见表 1。从表 1 中可以看出，层板厚板区与过渡区纤维丝束宽度和长度的差异不大，因此可以认为密实过程中层板过渡区纤维没有发生明显滑移和不同于厚板区的变形。同时由于没有观察到明显的富树脂区域，故层板的厚度和纤维分布主要由树脂流动决定。



(a) G0803 system



(b) G0827 system

图 6 单面模具吸胶工艺条件下固化层板显微照片

Fig. 6 Micrograph of cured laminates under the condition of one-sided mold and bleeder

表 1 厚板区和过渡区椭圆形丝束的几何参数

Table 1 Geometric parameters of ellipse yarn in thick area and transitional area

Fabric		Thick area		Transitional area	
		W/mm	H/mm	W/mm	H/mm
G0803	1#	1.466	0.155	1.470	0.154
	2#	1.546	0.155	1.458	0.154
	3#	1.543	0.162	1.539	0.162
	4#	1.534	0.158	1.535	0.150
G0827	5#	1.304	0.166	1.332	0.161
	6#	1.336	0.167	1.337	0.163
	7#	1.306	0.165	1.290	0.176
	8#	1.294	0.167	1.325	0.161

2.2 纤维分布与树脂流动分析

实验范围内，所制备的层板在厚板区和薄板区厚度分布都比较均匀，其中图 7 为 G0803 和 G0827 2 种预浸料分别采用单面、双面模具成型的层板的厚度分布结果，横坐标的位置如图 4 所示。通过超

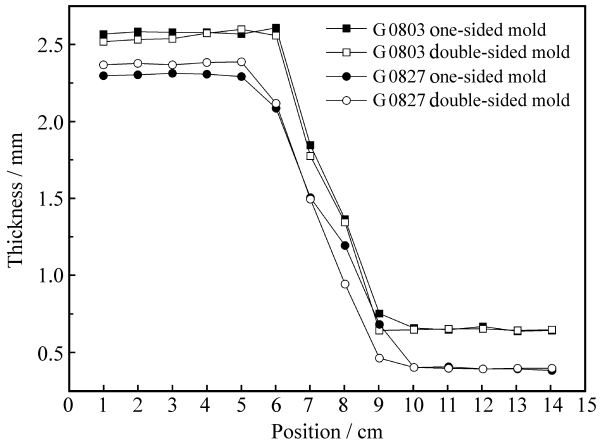


图 7 不同模具形式下层板的厚度分布

Fig. 7 Laminate thickness distribution in different mold types

声 A 扫描检测，所制备的层板内部无孔隙、分层等缺陷，故采用公式(1)计算得到厚板区与薄板区的平均纤维含量来表征纤维分布的状况。

为了考察层板上表面的形位控制对密实过程的影响，对比了 2 种模具形式对层板纤维分布的影响。图 8 所示为不同模具形式制备层板的纤维分布。图 9 所示为不同模具形式下不同位置处层板的吸胶量，其中层板序号与图 8 中相对应。由图 8 中可以看到，无论是 G0803 层板还是 G0827 层板，其厚板区纤维体积分数均要比薄板区高出 6%～8%。而在图 9 中，对比层板不同区域的单位面积单位铺层吸胶量，发现薄板区的吸胶量最大，过渡区次之，厚板区最小。这说明由于成型过程中存在面内流动，厚板区的部分树脂向过渡区和薄板区流动，使得薄板区吸胶材料的吸胶量最大，但纤维含量最小。纤维体积分数与吸胶量之间的差异说明面内流

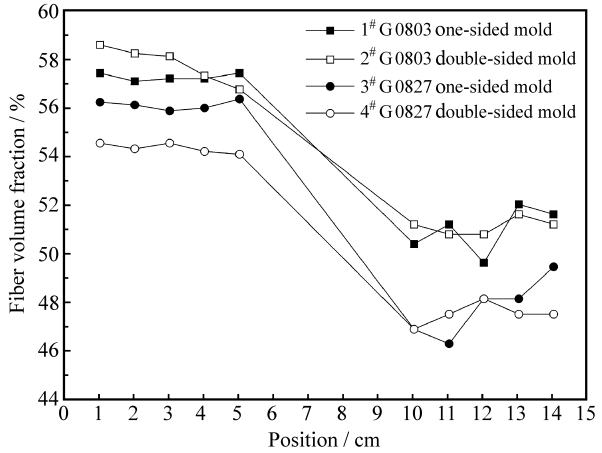


图 8 模具对 x 方向纤维分布的影响

Fig. 8 Effect of mold on fiber distribution along x direction

动对纤维分布起到了重要的作用。

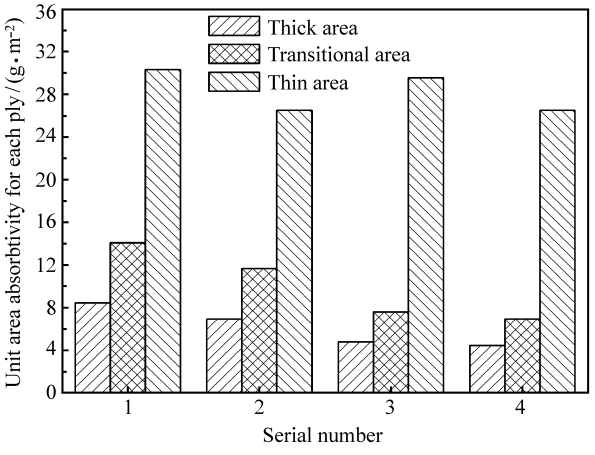


图 9　不同模具形式下吸胶量的统计

Fig. 9　Bleeding amount in different mold types

还可以看到，对于 G0827 层板，其单面模具层板的厚板区纤维含量要稍高于双面模具，这是由于采用双面模具制备层板时，橡胶软模的形位控制对保持厚板区与薄板区的纤维分布一致性起到一定的作用，影响了层板的受压，从而减小了 2 个区域纤维体积分数之间的差别；对于 G0803 层板，橡胶软模的这种作用不明显，可能与织物的可变形性有关。

纤维织物的渗透率对树脂流动的影响很大，为了分析渗透率对密实过程的影响，本文中测定了 2 种织物的 z 向(厚度方向)饱和渗透率和面内饱和渗透率。图 10 所示为 2 种织物的渗透率测试结果。可以看到，随着纤维体积分数的增加，2 种织物的面内渗透率与 z 向渗透率的比值均呈增大趋势，即

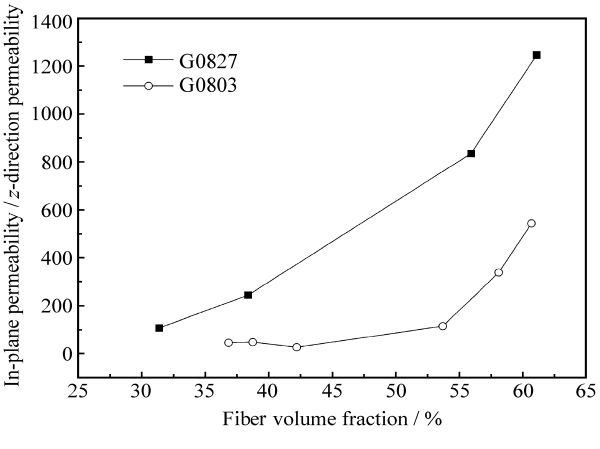


图 10　面内渗透率与 z 向渗透率的比较

Fig. 10　Comparison of in-plane permeability and z-directional permeability

随着密实过程的进行，面内流动的比例增大；在纤维体积分数为 35%～60%的范围内，G0827 面内渗透率与厚度方向渗透率的比值约为 G0803 的 2 倍。对比图 8 中 2 种材料体系的情况，可以看到 G0827 层板薄板区的纤维体积分数要比 G0803 层板低 2%～4%，这说明面内渗透率与 z 向渗透率的比值越大，则面内方向树脂流动的比例越大，层板薄板区纤维体积分数也越低。

图 11 所示为不同吸胶工艺制备层板的纤维分布。可以看到，无吸胶材料的零吸胶工艺与吸胶工艺的相比，厚板区与薄板区的纤维含量差值减小，纤维分布比较均匀。在吸胶工艺中，由于在层板表面只铺放一层吸胶布，厚板区流出的树脂量要高于单层吸胶布的饱和吸胶量，若厚板区吸胶材料内吸胶量接近或达到饱和时，树脂将在吸胶布内由厚板区向薄板区方向进行流动，因此面内流动同时发生在铺层内和吸胶材料内。采用零吸胶工艺时，只有少量树脂吸入隔离材料，可以认为面内流动只发生在铺层内，从图 11 中的结果看，这种情况下厚板区与薄板区之间纤维体积分数的差别在 1%左右；而在加入吸胶材料后它们的差别扩大到了 7%左右，说明吸胶材料的面内流动对纤维分布的影响很大。

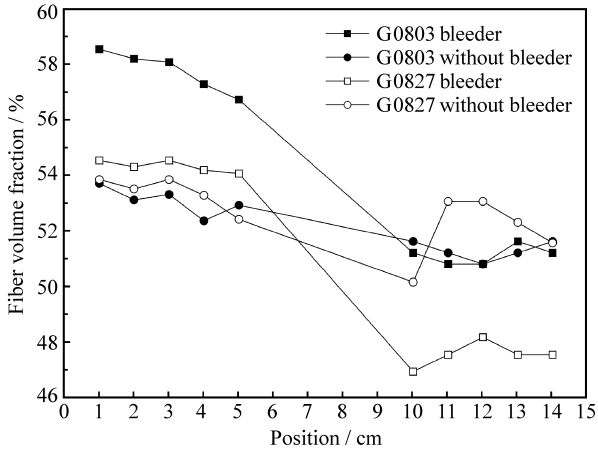


图 11　吸胶材料对 x 方向纤维分布的影响

Fig. 11　Effect of bleeder on fiber distribution along x direction

通过以上的实验分析可知，变厚度层板的纤维分布是层板内面内流动、厚度方向流动与吸胶层面内流动相互竞争的结果，工艺中除了改变温度、压力，还可以根据纤维层和树脂的工艺特性，通过采用不同吸胶能力、不同面内渗透率的吸胶材料对层板不同区域纤维分布的差异进行调节。

3 结 论

（1）吸胶工艺条件下，由 G0803 碳纤维缎纹布/环氧 914 和 G0827 碳纤维单向布/环氧 914 制备的 2 种变厚度层板厚板区的纤维体积分数均比薄板区高 6%～8%，而密实过程中树脂的二维流动是其主要成因。

（2）随着纤维体积分数的增加，G0803 和 G0827 织物的面内渗透率与 z 向渗透率的比值呈增大趋势，且 G0827 的渗透率比值约为 G0803 的 2 倍，使得 G0827 面内流动比例更大，其变厚度层板薄板区纤维体积分数也更低。

（3）与吸胶工艺相比，无吸胶材料的零吸胶工艺下层板纤维分布比较均匀，说明吸胶材料的面内流动对纤维分布的影响很大；变厚度层板的纤维分布是层板内面内流动、厚度方向流动与吸胶层面内流动相互竞争的结果。

参考文献：

[1] 孙 秦，席德科，侯成义. 变厚度多层介质结构的一种三维数值半解析方法 [J]. 应用力学学报，1999，16(3)：71-76.
Sun Qin，Xi Deke，Hou Chengyi. A new 3-D numerical semi-analytical algorithm for multiply composite structures with varied thickness [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics，1999，16(3)：71-76.

[2] Poon C Y，Ruiz C. Finite element analysis of a tapered composite [J]. Composites Science and Technology，1994，51(3)：429-440.

[3] 顾轶卓，张佐光，李 敏，等. 复合材料变厚层板热压成型缺陷类型与成因实验研究 [J]. 复合材料学报，2008，25(2)：41-46.
Gu Yizhuo，Zhang Zuoguang，Li Min，et al. Experimental study on type and cause of defects in variable thickness composite laminates during hot pressing proces [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2008，25(2)：41-46.

[4] Loos A C，Springer G S. Curing of epoxy matrix composites [J]. Journal of Composite Materials，1983，17(2)：135-169.

[5] Gutowski T G，Morigaki T，Cai Z. The consolidation of laminate composites [J]. Journal of Composite Materials，1987，21(2)：173-188.

[6] Dave R，Kardos J L，Dudukovic M P. A model for resin flow during composite processing Ⅰ：General mathematical development [J]. Polymer Composites，1987，8(1)：29-38.

[7] Dave R. A unified approach to modeling resin flow during composite processing [J]. Journal of Composite Materials，1990，24(1)：22-41.

[8] Saunders R A，Lekakou C，Bader M G. Compression and microstructure of fiber plain woven cloths in the processing of polymer composites [J]. Composites Part A：Applied Science and Manufacturing，1998，29(4)：443-454.

[9] 简抗抗，张佐光，顾轶卓，等. 不同纤维堆积状态下饱和渗透率实验研究 [J]. 复合材料学报，2006，23(1)：31-36.
Jian Kangkang，Zhang Zuoguang，Gu Yizhuo，et al. Experimental research of saturated permeability with different fiber stacking states [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2006，23(1)：31-36.