

文章编号:1000-6893(2009)04-0757-06

# 热压罐成型复合材料复杂结构 对制造缺陷的影响规律

王雪明<sup>1,2</sup>, 谢富原<sup>1,2</sup>, 李敏<sup>1</sup>, 戴棣<sup>2</sup>, 王菲<sup>2</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 100191)

(2. 北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

## Effect Rules of Complex Structure on Manufacturing Defects for Composites in Autoclave Molding

Wang Xueming<sup>1,2</sup>, Xie Fuyuan<sup>1,2</sup>, Li Min<sup>1</sup>, Dai Di<sup>2</sup>, Wang Fei<sup>2</sup>, Zhang Zuoguang<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,  
Beijing 100191, China)

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

**摘要:** 飞行器复合材料种类多、结构形式复杂,制造缺陷种类、形成机制及影响因素也较为复杂。基于大量复合材料制件无损检测数据的统计结果,分析了热压罐成型工艺中常见缺陷的类型,揭示了复合材料复杂结构对制造缺陷的影响规律,初步分析了缺陷的产生机制。结果表明,分层、气孔和孔隙是热压罐成型工艺中比例较高的3类缺陷,复合材料制件结构的复杂性直接影响缺陷的出现比例,复合材料制件的几何特征和成型工艺对制造缺陷的影响规律较为明显。研究结果对制造缺陷的控制及复合材料制件结构设计具有重要的指导意义。

**关键词:** 复合材料; 层合板; 复杂结构; 热压罐成型; 缺陷; 分层; 孔隙

**中图分类号:** TB332      **文献标识码:** A

**Abstract:** The types of composite components applied in aircrafts are different and complex, and the type, formation mechanism, and influence factor of manufacturing defects are also complex. These defects that often arise in autoclave molding are summarized, and the effect rules of complex structure on manufacturing defects are revealed on the basis of statistical analysis of a considerable amount of defect information obtained by non-destructive testing of composite components. Moreover, the formation mechanism is primarily analyzed. It is observed that delamination, pore, and void are the three main defect types in autoclave molding. In addition, the ratio of defect appearance is obviously influenced by the complexity of composite components. Geometric characteristics and the molding process for composite components have significant influence on the type and ratio of defects. The results are valuable for the controlling of manufacturing defects and the structure design of composite components.

**Key words:** composites; laminate; complex structure; autoclave molding; defect; delamination; void

在复合材料制件制造过程中由于环境、原材料缺陷、工艺规范和结构设计不合理等因素会产生各种缺陷,制造缺陷的存在严重影响了复合材料的性能和使用寿命,甚至还会导致复合材料制件的报废,造成重大经济损失。因此,制造缺陷的控制技术是目前先进树脂基复合材料成型工艺领域的重要研究内容。复合材料层合板制造缺陷(如孔隙)一般形成机理的研究工作目前国内外均有开展<sup>[1-4]</sup>,但复杂结构与制造缺陷之间的关联性

问题一直未得到充分的关注和研究,仅仅就某种形式(如L形和非等厚层板)的制造缺陷有相关研究,采用数值模拟<sup>[5-6]</sup>和实验研究<sup>[7-13]</sup>的手段揭示了L形、非等厚层板中易产生的缺陷类型及其产生机制。由于复合材料成型过程的复杂性,采用同一材料和工艺方法的不同结构形式会伴有极为相异的缺陷特征。飞行器复合材料制件种类繁多,从层合板、加筋板、夹层板到整体化结构不一,且结构形式复杂,若系统研究结构形式与制造缺陷的关联规律需设计大量实验,经费需求较大。本文采用统计的方法,对近万余件飞机结构用复合材料制件无损检测数据进行了系统分析,分析

了复合材料制件热压罐成型工艺中常见缺陷的种类,揭示了复合材料复杂结构对制造缺陷的影响规律,这对制造缺陷的控制及复合材料制件的结构设计具有重要的指导和借鉴意义。

## 1 统计数据样本及边界条件

飞行器复合材料制件种类繁多,结构形式复杂,本文统计了蒙皮、梁、肋、角材、壁板类和蜂窝

夹层结构等共计 22 类。统计的复合材料制件类型、缺陷种类以及各类制件的缺陷分布的原始统计数据样本如表 1 所示。

统计的复合材料制件均采用热压罐固化成型,所用材料体系均为碳纤维/QY8911-I;所用模具均为橡胶软模与钢质阳模配合,软模辅助加压;含曲率半径制件均采用阳模成型;制件厚度范围介于 1.06~11.00 mm。

表 1 复合材料制件制造缺陷统计数据样本

制件类型	分层	疏松	孔隙	气孔	富脂	贫胶	脱粘	弱粘	变形	有缺陷件	无缺陷件
等厚层板	2	—	17	1	—	—	—	—	—	20	467
非等厚层板	35	—	9	16	23	—	—	—	1	84	1 461
L 形	3	—	23	—	—	2	—	—	15	43	2 947
U 形	46	15	18	14	2	2	—	—	4	101	813
盒形	261	4	31	42	8	12	—	—	4	362	3 995
工形	86	18	12	8	6	20	—	—	—	150	634
胶接件	59	—	18	11	12	13	39	22	1	175	1 660
总计	492	37	128	92	51	49	39	22	25	935	11 977

## 2 制造缺陷的类型及对比分析

本文统计的缺陷类型均是复合材料制件采用无损检测(超声扫描、X 射线等)根据制件的检测标准确定的,对于制件中可能存在的纤维屈曲、纤维分布不均、厚度不均等缺陷类型不在本文统计范围之列,常见的缺陷类型及其比例如图 1 所示,缺陷比例是由各类型缺陷的制件数与总缺陷件数的比值来表示的。

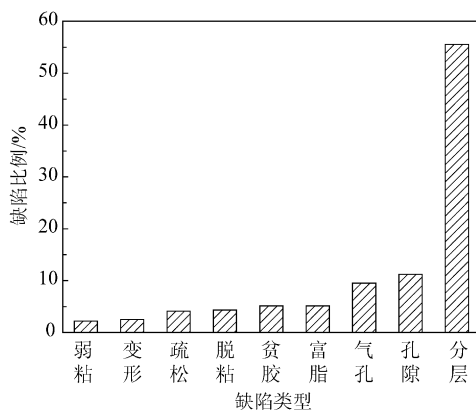
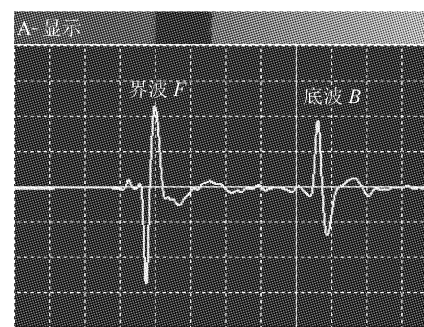


图 1 缺陷类型对比图

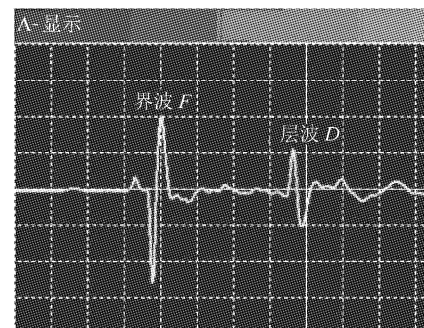
Fig. 1 Contrast graph for defect types

由图 1 可见,在复合材料制件中主要缺陷的比例从高到低依次为分层、孔隙、气孔、富脂、贫胶、脱粘、疏松、变形和弱粘;其中分层所占比例最

高,超过 50%,气孔、孔隙的比例也比较高,其他缺陷比例相对较低。超声 A 扫描界波最高位置为表层位置,底波最高位置为底层位置,二者之间距离即为制件厚度,界波与底波间如是一条直线则表明没有缺陷(见图 2(a)),如出现不规则波形及底波消失则表明存在缺陷。通过超声 A 扫描



(a) 无缺陷区



(b) 分层区

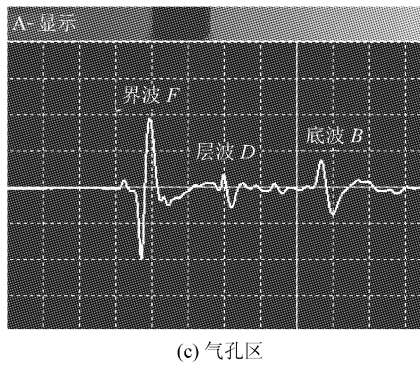


图 2 分层与气孔超声 A 扫描波形图  
Fig. 2 Ultrasonic A-scan waveform for delamination and pore

可看到由于缺陷造成的波形,因此,无损检测结果只能提供复合材料层间的结合信息,但无法给出缺陷的形成原因。气孔和孔隙形成机制基本相同,主要来源均是夹杂空气、吸湿水、挥发性溶剂等,气孔是孔隙长大到一定程度,呈宏观状态出现的一种缺陷形式,在无损检测中二者的区别:①面积大小不同;②气孔多以单个状态出现,而孔隙多呈密集型分布。复合材料在制造过程中分层的产生机制极为复杂,且分层和气孔的超声 A 扫描波形极为类似,主要是根据有无底波(见图 2(b)和 2(c))和缺陷面积来界定分层和气孔的,一般如底波消失的缺陷或根据检测标准达到一定面积的气孔均判为分层。

### 3 结构形式对制造缺陷影响作用的统计结果与分析

由于复合材料成型过程的复杂性,结构形式的多样化和成型工艺的差异,引起成型过程受力和温度分布的复杂,致使树脂流动形式比平板复杂得多,产生的缺陷类型及分布也有所不同,统计结果显示制造缺陷与制件的结构形式有一定的关联性。下面就构形要素、几何要素、工艺要素对制造缺陷及其分布的影响逐一分析。

#### 3.1 构形要素对制造缺陷的影响

根据制件截面形状,制件构形主要有(等厚度、非等厚度)层板、L 形、U 形、工形和盒形,典型制件实物如图 3 所示。

构形要素对制造缺陷影响统计结果见表 2,缺陷比例由各构形制件的缺陷件与其总件数的比值表示,不同构形制件出现的缺陷件比例对比如图 4 所示。

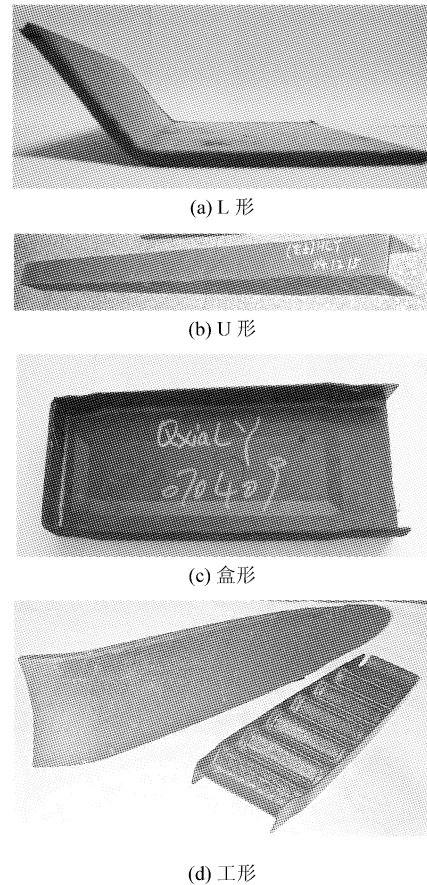


图 3 典型复合材料制件实物图  
Fig. 3 Photo of typical composite components

表 2 构形要素对制造缺陷影响统计结果

Table 2 Statistical results of effect of configuration factor on manufacturing defects

制件构形	分层	疏松	孔隙	气孔	富脂	贫胶	变形	总计
层板/%	2.28	—	0.58	1.05	1.50	—	0.06	4.50
U 形/%	5.11	1.67	2.00	1.55	0.22	0.22	0.44	9.67
工形/%	11.20	2.34	1.56	1.04	0.78	2.60	—	17.44
盒形/%	6.03	0.16	0.72	0.97	0.18	0.32	0.09	7.56
L 形/%	0.10	—	0.77	—	—	0.06	0.50	1.44

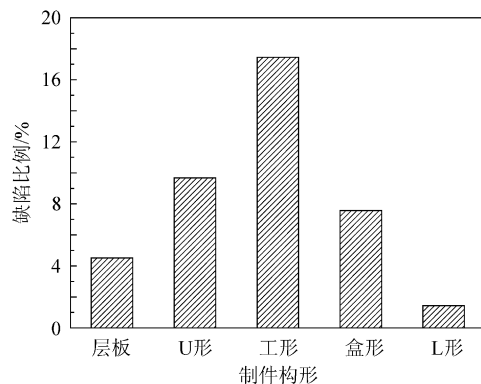


图 4 典型制件缺陷比例对比图  
Fig. 4 Contrast graph for defect ratio of typical components

由图4可见,采取同样成型工艺不同构形制件出现缺陷的比例有很大的差异,构形越复杂则出现缺陷的比例越高,构形越简单则反之。以工形制件的成型技术为例(见图5),其构形主要由2个U形、2个突缘、2个填料分开铺叠、预吸胶,再组装在一起而成,结构中存在拐角曲率和填充区,成型时需多个模具配合,因此结构的复杂增加了其成型的难度,出现缺陷的比例也随之增加,缺陷件比例高达17.4%;U型、盒型结构相对简单,成型工艺较易实现,缺陷件比例稍低(8%左右);层板、L形最为简单,缺陷件比例也是最低的(2%左右)。由于统计的层板结构主要是非等厚层板,非等厚层板存在厚度突变区,其结构不对称程度相对L形复杂些,所以致使层板类制件出现缺陷的比例比L形制件稍大些。树脂流动包括两种形式:①沿垂直于层板方向流进吸胶层;②在层板内沿平行于纤维的方向流出体系。在等厚度层板结构中,当内尺寸远大于厚度尺寸且四边受档条或密封胶条限制时,可以认为在等厚层板成型过程中树脂只沿厚度方向流动,即在一维压缩条件下的一维流动<sup>[14]</sup>,压力传递和温度分布较为均匀,出现缺陷的比例较低。而在非等厚层板、工形等复杂制件中,第②种流动不可忽略,树脂流动与纤维密实可能是多维压缩/多维流动<sup>[5,10-11]</sup>,存在渗流机制与剪切流机制之间的耦合作用;且由于制件形状的复杂性和橡胶软模的导热性能差,会造成层板在除厚度方向外的其他方向温度分布不均匀,树脂流动与纤维密实程度较低,会产生分层、气孔、孔隙和疏松等缺陷。因此,构形要素对制造缺陷有很大影响,构形的复杂程度直接影响出现缺陷的比例。构形要素对孔隙、分层的影响如图6和图7所示。

目前对孔隙的形成机制和控制方法已有了系统的研究,孔隙的主要来源是预浸料中的挥发性

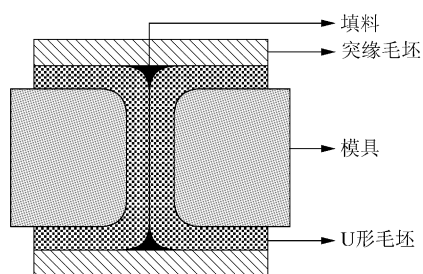


图5 工形制件成型技术

Fig. 5 Molding technology for "I" shape

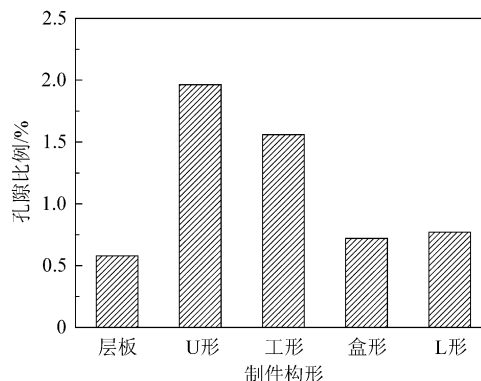


图6 构形要素对孔隙的影响

Fig. 6 Effect of configuration factor on void

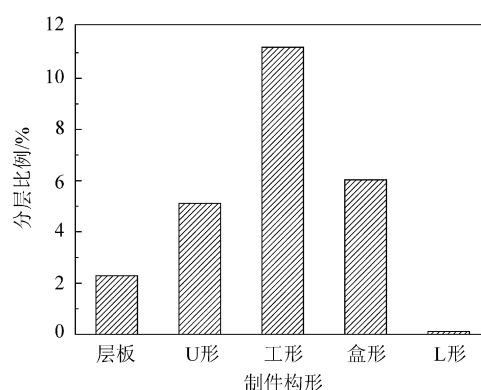


图7 构形要素对分层的影响

Fig. 7 Effect of configuration factor on delamination

溶剂、铺层过程中的夹杂空气、在贮存和运输过程中可能会吸收的空气中的水蒸气。对于特定的树脂体系,只要控制好加压时机和成型压力<sup>[4]</sup>,在成型过程中吸湿水和夹杂空气形成的气泡可以通过树脂流动和压力作用下溶解两种方式来消除。因此,本文统计的复合材料制件出现孔隙的比例均在2%以下(见图6),而构形简单的层板和L形制件则更低(0.5%左右),孔隙缺陷可以得到很好的控制。

相对孔隙而言,分层的形成机制较为复杂,成因较多,一方面复杂制件结构上的非对称性和复杂性会造成纤维分布不均,以及结构中温度分布不均,降温过程中制件内部产生较大的内应力,会导致分层;另一方面如排气不畅,成型过程中气孔长大形成分层,其形成机制与孔隙相同;此外还有可能预浸料局部污染、夹杂等造成分层。因此,分层不易控制,缺陷件比例因结构形式的差异而相差较大,由图7可见,构形复杂的工形制件分层比例最高(11.2%),制件简单的层板和L形制件可以控制在3%以下。

### 3.2 几何要素对制造缺陷的影响

某一种构形要素往往是多种几何要素的集合体,即在一个制件中通常存在多种几何要素,如厚度、曲率、变厚梯度等,所以构形要素对制造缺陷的影响是多种几何要素综合作用的结果。为研究结构形式与制造缺陷的关联规律,需要将结构形式转化为几何要素,重点研究几何要素与制造缺陷的关联规律,这样更具有普遍意义,在此基础上通过几何要素将结构形式与制造缺陷建立联系,揭示缺陷的产生规律,为复合材料结构设计提供指导。本文根据缺陷出现位置的几何特征,提取了具有共性的几何要素:层板厚度、变厚梯度、外形曲率、自由边界、纤维非连续,并统计分析了不同几何要素对制造缺陷的影响规律。如缺陷周围同时存在多种几何要素,统计时按如下原则进行界定:①有变厚梯度和厚度时优先考虑变厚梯度;②有外形曲率和厚度时优先考虑曲率;③梯度和外形曲率均不存在时考虑厚度;④梯度、外形曲率附近处的缺陷也归为变厚梯度或外形曲率的影响。统计结果如表3所示,表中数值为各缺陷件与含相应几何要素制件的总件数的比值。

表3 几何要素对制造缺陷影响统计结果

Table 3 Statistical results of effect of geometry factor on manufacturing defects

几何要素	分层	疏松	气孔	孔隙	贫胶	富脂	总计
层板厚度/%	6.20	1.00	1.90	0.80	1.70	0.90	12.50
变厚梯度/%	2.50	—	1.60	0.66	—	2.70	7.46
外形曲率/%	3.90	1.48	0.74	0.70	0.43	—	7.25
自由边界/%	1.00	1.70	0.74	0.10	1.00	1.00	5.54
纤维非连续/%	8.57	—	—	—	—	—	8.57

由表3可见,层板厚度对分层、气孔影响较大,制件较厚时,成型过程中厚度方向存在温差,有时外表面树脂已凝胶而内部尚未凝胶,夹杂空气和挥发份不易排出,会在制件内部形成气孔和孔隙、制件外表面产生疏松和分层。变厚梯度区由于铺层长短不同,互相搭接,存在纤维很难填充到的三角区和纤维不连续区,加之树脂的二维流

动和纤维的滑移,容易引起应力集中,因此,变厚梯度会导致分层和富脂。本文统计的含曲率制件多采用阳模成型,如果曲率半径过小、则预浸料铺层铺覆时与模具配合不好,橡胶软模传压的均匀性降低,造成预浸料层间密实不好,最易产生分层。自由边界产生的缺陷具有一定的随机性,分层、疏松相对多些,在复杂制件的边缘部位为防止树脂流失多存在橡胶挡条,如挡条高度与制件高度不相当时会导致边缘部位加压不好,因此会产生分层与疏松缺陷。纤维非连续主要是指装配件的钉孔处,由于钉孔时外力的冲击损伤会产生分层。至于变厚梯度、曲率变化对制造缺陷的影响机制将在后续工作中深入研究。

### 3.3 工艺要素对制造缺陷的影响

从成型工艺考虑,本文统计的制件主要采用了3种工艺方法:固化、胶接共固化、二次胶接。固化工艺主要是指制件经预吸胶后再固化成型;胶接共固化是把一个或多个已固化成型而另一个或多个尚未固化的制件通过胶模,在一次固化中固化并胶接成一个整体制件;二次胶接主要是指两个或多个已固化成型的制件经胶模固化胶接在一起。不同成型方法所产生缺陷的种类和所占比例有所不同,工艺方法对缺陷的影响如表4所示,表中数值均为各缺陷件数与相应工艺制件总数的比值。

由表4可见:3种工艺对分层的影响均较大;胶接共固化工艺对各类缺陷均有所影响,除分层外其他类型的缺陷可能是已固化制件中的原有缺陷,也可能是未固化制件经胶接共固化工艺后产生的,而分层除上述原因外还可能是原有分层在经历二次热压成型后发生扩展,可见分层产生机制的复杂性;二次胶接工艺最易产生脱粘和弱粘,其中脱粘比例明显大于其他工艺对缺陷的影响,这是由于采用二次胶接工艺的主要是蜂窝夹层结构,在该类制件中为保证板芯胶接质量有时不可避免造成板板胶接质量不好,造成脱粘或弱粘,所以脱粘这一类缺陷受胶接工艺影响最大。

表4 工艺要素对制造缺陷影响统计结果

Table 4 Statistical results of effect of forming process on manufacturing defects

工艺方法	分层	疏松	孔隙	气孔	富脂	贫胶	脱粘	弱粘
固化工艺/%	4.18	0.38	0.88	0.79	0.37	0.36	—	—
胶接共固化工艺/%	3.09	—	0.55	0.67	0.73	0.73	0.73	0.85
胶接工艺/%	4.85	—	—	—	—	—	16.36	4.24

## 4 结 论

(1) 在热压罐成型工艺中,飞机结构用复合材料制件中制造缺陷的类型及其所占比例依次(由大到小)为:分层、孔隙、气孔、富脂、贫胶、脱粘和疏松等。

(2) 复合材料制件结构的复杂性直接影响缺陷的出现比例,工形制件缺陷件比例高达17.4%,远远大于结构简单的层板(4.5%)、L形制件(1.4%)的缺陷比例。

(3) 复合材料制件的几何特征对制造缺陷的影响具有一定的规律性,变厚梯度会产生分层和富脂,层板厚度多产生分层、气孔,自由边界形成的制造缺陷具有随机性,外形曲率和纤维非连续会产生分层。

(4) 复合材料制件的成型工艺对制造缺陷作用规律较明显,固化工艺会导致分层、气孔、孔隙;胶接共固化工艺会产生分层、弱粘和脱粘;胶接工艺则主要是弱粘和脱粘。

## 参 考 文 献

- [1] Boey F Y C, Lye S W. Void reduction in autoclave processing of thermoset composites. I: high pressure effects on void reduction[J]. *Composites*, 1992, 23(4): 261-265.
- [2] Kardos J L, Dudukovic M P, Dave R. Void growth and resin transport during the processing of thermosetting matrix materials[J]. *Advances in Polymer Science*, 1986, 80: 101-123.
- [3] Wood J R, Bader M G. Void control for polymer-matrix composites (1): theoretical and experimental methods for determining the growth and collapse of gas bubbles[J]. *Composites Manufacturing*, 1994, 5(3): 139-147.
- [4] 汪赫男, 张佐光, 顾轶卓. 环氧复合材料层板热压成型孔隙缺陷影响因素[J]. *复合材料学报*, 2007, 24(5): 55-60.  
Wang Henan, Zhang Zuoguang, Gu Yizhuo. Effects of different factors on the void defect in epoxy composite laminates in hot pressing process[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2007, 24(5): 55-60. (in Chinese)
- [5] Li M, Charles L, Tucker III. Modeling and simulation of two-dimensional consolidation for thermoset matrix composites[J]. *Composites, Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2002, 33(6): 877-892.
- [6] 李艳霞, 李敏, 张佐光, 等. L形复合材料层板热压工艺压实变形过程的树脂模拟[J]. *复合材料学报*, 2008, 25(3): 78-83.  
Li Yanxia, Li Min, Zhang Zuoguang, et al. Numerical simulation on consolidation and deformation of L-shaped composite laminate in autoclave process[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(3): 78-83. (in Chinese)
- [7] 顾轶卓, 张佐光, 李敏, 等. 复合材料变厚度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 process[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(2): 41-46. (in Chinese)
- [8] Naji M I, Hoa S V. Curing of thick angle-bend thermoset composite part: curing cycle effect on thickness variation and fiber volume fraction[J]. *Journal of Reinforced Plastic and Composites*, 1999, 18(8): 702-723.
- [9] Naji M I, Hoa S V. Curing of thick angle-bend thermoset composite part: curing process modification for uniform thickness and uniform fiber volume fraction distribution[J]. *Journal of Composites Materials*, 2000, 34(20): 1710-1760.
- [10] Hubert P, Vaziri R, Poursartip A. A two-dimensional flow model for the process simulation of complex shape composite laminates[J]. *Int Numerical Methods in Engineering*, 1999, 44(1): 1-26.
- [11] Hubert P, Vaziri R, Poursartip A. A review of flow and compaction modeling relevant to thermoset matrix laminate processing[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 1998, 17(4): 286-318.
- [12] Hubert P, Poursartip A. Aspects of the compaction of composite angle laminates: an experimental investigation[J]. *Journal of Composite Materials*, 2001, 35(1): 2-26.
- [13] 邓火英, 张佐光, 顾轶卓. L形层板真空袋成型缺陷的实验研究[J]. *复合材料学报*, 2007, 24(4): 34-39.  
Deng Huoying, Zhang Zuoguang, Gu Yizhuo. Experiential research on defects of L-shape laminates in vacuum-bag process[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2007, 24(4): 34-39. (in Chinese)
- [14] 李辰砂, 张博明, 王殿富, 等. 用数值模型研究复合材料固化过程规律[J]. *复合材料学报*, 2000, 17(4): 92-99.  
Li Chensha, Zhang Boming, Wang Dianfu, et al. Studying the curing process of composite by numerical model[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2000, 17(4): 92-99. (in Chinese)

### 作者简介:

王雪明(1977—) 男,博士研究生。主要研究方向:先进树脂基复合材料。

Tel: 010-85701520

E-mail: wtj1998@mse.buaa.edu.cn

张佐光(1952—) 男,教授,博士生导师。主要研究方向:先进树脂基复合材料。

Tel: 010-82317122

E-mail: zgzhang@buaa.edu.cn

(责任编辑:蔡斐,杨冬)