

# 复合材料 I 型结构热压罐零吸胶工艺树脂压力测试及硬模传压均匀性分析<sup>\*</sup>

孙 凯,刘卫平,黄志军,孙 成,陈 萍,李志远

(上海飞机制造有限公司航空制造技术研究所,上海 200436)

**[摘要]** 针对 977-2/IMS 预浸料在热压罐零吸胶工艺下采用 H 型方式成型的 I 型零件,分别采用标准固化制度及阶梯加压制度进行了树脂压力在线测试,基于测试结果,分析了树脂压力与罐压的等效性及硬模传压的均匀性,提出了实际零件硬模传压的测试制度参考。结果表明:单侧硬模传压区域的树脂压力在稳定后与罐压一致,验证了预浸料在热压罐零吸胶工艺下树脂压力与铺层压力的等效性;双侧硬模传压区域的树脂压力存在载荷平衡的过程,稳定后不同区域的树脂压力均匀并与罐压一致;与阶梯加压制度相比,标准固化制度下树脂压力在测试初期存在一定波动,稳定后两种工艺制度下的树脂压力一致,这为热分布差异相对较大零件的树脂压力测试提供了方法参考。

**关键词:** 复合材料 I 型结构;热压罐零吸胶工艺;树脂压力;硬模传压;加压制度

## Resin Pressure Test of Composite I Shape Structure in Autoclave Zero-Bleeding Process and Pressure Uniformity Analysis of Pressure Transfer With Rigid Mold

SUN Kai, LIU Weiping, HUANG Zhijun, SUN Cheng, CHEN Ping, LI Zhiyuan

(Institute of Aeronautical Manufacturing Technology, Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

**[ABSTRACT]** For I shape parts made by 977-2/IMS prepreg using H type molding in autoclave zero-bleeding process, resin pressure has been tested by using online standard curing cycle and step pressurization cycle respectively. The equivalence of resin pressure and autoclave pressure is investigated and the uniformity of pressure transfer with rigid mold is analyzed according to the resin pressure test results. The results indicate that the resin pressure is consistent with autoclave pressure in one side rigid mold area after stabilization. The equivalence of resin pressure and layer pressure in autoclave zero-bleeding process is verified. The resin pressure has a load balance procedure in two-side rigid mold. The resin pressure is even in different area and is consistent with the autoclave pressure. Compared with step pressurization cycle, the resin pressure has some fluctuations of the standard curing cycle in the initial stage of the test. However, the resin pressures under the two process cycles are the same after stabilization. It provides a reference for the resin pressure test of parts whose thermal distribution is relevant large different.

**Keywords:** Composite I shape structure; Autoclave zero-bleeding process; Resin pressure; Pressure transfer of rigid mold; Pressurization cycle

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.23/24.087

近年来复合材料在飞机中的用量激增<sup>[1]</sup>,已成为衡量飞机先进性的重要指标。目前,民用飞机的复合材料主承力结构如机身壁板、翼面类加筋壁板及梁等,主要由单向带预浸料铺层在热压罐零吸胶工艺下制备而成。翼面类加筋壁板结构的筋条通常设计为 T 型或 I 型,部分机型的梁结构也设计为 I 型,此类零件一般采用双侧硬模的方式制备。硬模传压的效果直接决定了零件的

成型质量,因此研究硬模传压的有效性及其均匀性对于 T 型或 I 型零件成型过程的机理分析及对内部质量的控制是十分重要的。

预浸料铺层在成型过程中的树脂压力与铺层外压存在一定的关系,通过对树脂压力的测试可以间接反映硬模传压的效果。Campbell<sup>[2-3]</sup>将传感器安装在模具表面,测试构件与模具接触面位置的树脂压力;Lynch<sup>[4]</sup>及顾轶卓等<sup>[5]</sup>利用液体传压特性设计并制造了操作方便、

<sup>\*</sup> 基金项目:中国商飞关键技术攻关项目(C919-C030601-24-1)。

可重复使用的树脂压力测试系统;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进一步优化了树脂压力测试系统,实现了热压罐树脂压力的在线测试,对树脂压力测试系统的适用性进行了研究<sup>[6]</sup>,并成功运用于等厚层板、变厚层板及L型层板等的相关研究<sup>[7-9]</sup>,上述研究主要针对小尺寸铺层进行压力传递的分析。

本文利用北航优化的热压罐树脂压力在线测试系统,对977-2/IMS预浸料在热压罐零吸胶工艺下采用H型方式成型的复合材料I型梁结构,进行了不同模具配合区域的树脂压力在线测试,对树脂压力与铺层压力的等效性进行研究,分析硬模传压的有效性及其均匀性,这对此类零件的内部质量分析具有重要意义。

## 1 试验

### 1.1 试验原料与设备

(1) 原材料: CYCOM 977-2-35-24K IMS-194 高温预浸料(简称为977-2/IMS预浸料)树脂质量分数为35%,名义单层厚度为0.188mm。

(2) 设备: 热压罐, ASC公司;树脂压力在线测试系统,量程-0.1~2MPa,精度0.25%FS,北京航空航天大学; Nikon EPIPHOT300金相显微镜。

### 1.2 试验件及工装介绍

(1) 零件介绍: 零件为I型梁结构,长840mm,腹板高度约190mm,腹板沿长度方向有3个厚度区,厚度分别为5.64mm、4.316mm、2.632mm,其中第二个厚度区中存在凸台,凸台厚度为6.956mm。为操作方便,树脂压力测试时没有铺放梁的上下缘条盖板,缘条区的厚度为腹板区厚度的一半。零件示意图见图1。

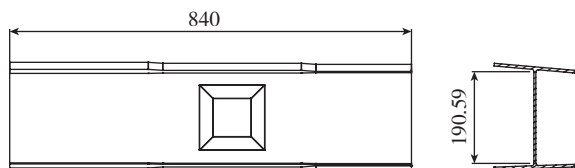


图1 I型梁零件示意图

Fig.1 Schematic diagram of I shape spar

(2) 工装介绍: 树脂压力测试中使用的梁工装分为上模体及下模体。工装组合形式及型面检测情况见图2。上模体的型面偏差为-0.12~0.06mm,下模体的型面偏差为-0.13~0.08mm,均满足对工装型面轮廓度±0.2mm的偏差要求。

### 1.3 树脂压力测试方法

(1) 树脂压力测试系统。

测试原理: 将很细的压力偶线(金属探针)置于测试位置,当温度升高,树脂黏度降到一定程度时,压力偶

线端部的树脂压力会通过内部的传压液(硅油)无损传递到外部的压力传感器,从而可实时监测高温环境下的树脂压力<sup>[6]</sup>。

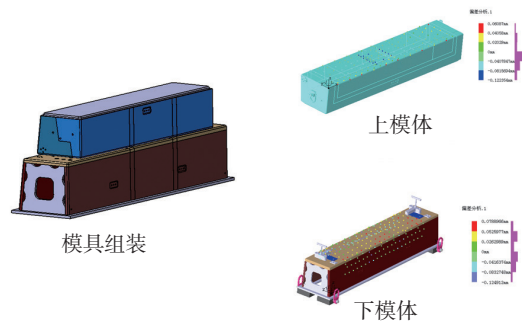


图2 树脂压力测试用工装示意图

Fig.2 Schematic diagram of the tool for resin pressure test

系统标定: 将压力偶线端头置于容器中的硅油液面下,对比随罐压增大时硅油压力测试值与罐压的差异。测试中采用了4路压力偶线,标定结果见图3。可见,硅油压力测试值随罐压升高而迅速升高,保压阶段与罐压一致。说明树脂压力测试系统测试结果可靠。

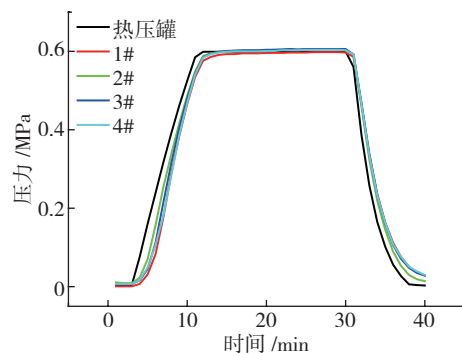


图3 树脂压力测试系统标定曲线

Fig.3 Calibration curve of resin pressure measurement system

(2) I型结构树脂压力测试。

测试位置: 共4处压力偶线,其中1处在缘条侧,测试单侧硬模传压效果;3处在腹板侧,测试点所处的位置料层厚度分别为5.64mm、6.956mm、4.316mm,测试双侧硬模传压效果。压力偶线放置的测试点位置见图4,压力偶线放置的截面位置见图5。

测试制度: 采用了阶梯加压制度及标准加压制度。阶梯加压制度: 抽真空至-0.074MPa,随后加压,当加压至0.14MPa时真空袋通大气;随后开始加热,当测试热电偶温度达到90℃时继续加压至0.61MPa,待热电偶升温至174℃进入保温阶段,保温一段时间后,压力测试值出现无规律状态时,停止保温,降温卸压出罐。标准固化制度: 抽真空至-0.074MPa,随后加压,当加压至0.14MPa时真空袋通大气,继续升压至0.61MPa后开始加热,待测试热电偶升温至174℃时进入保温阶段,保

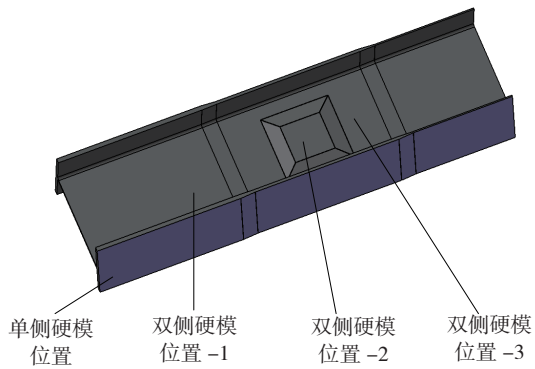


图4 树脂压力测试位置示意图

Fig.4 Schematic diagram of resin pressure test position

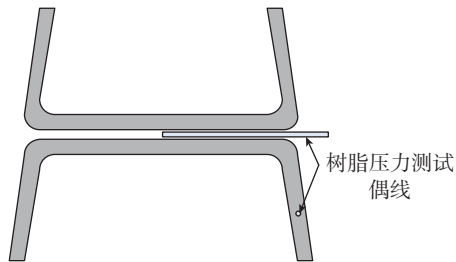


图5 树脂压力测试偶线放置截面图

Fig.5 Section diagram of resin pressure measurement line

温一段时间后,压力测试值出现无规律状态时,停止保温,降温卸压出罐。

## 2 结果与讨论

### 2.1 树脂压力与铺层压力的等效性分析

在单侧硬模区域,罐压将通过真空袋、透气毡等封装材料无损传递至铺层,即单侧硬模区域的铺层压力与外压一致。图6、图7分别为单侧硬模区域阶梯加压制度与标准固化制度下的树脂压力测试曲线。可见,在两种测试制度下,树脂压力均随罐压增加而逐渐增大,稳定后与罐压一致,即可得出单侧硬模区域的树脂压力与铺层压力一致。

在复合材料热压罐成型过程中,外加压力由树脂和纤维共同承担<sup>[10-12]</sup>。零吸胶工艺下,复合材料在成型过程中几乎没有树脂流出,纤维含量变化很小。对单向带层板,纤维极限体积分数为90.6%<sup>[13]</sup>,试验中选取的977-2/IMS预浸料纤维体积分数约为60%,通过金相显微镜观察的纤维分布照片参见图8,可见层板中的纤维呈分散分布。因此,理论上,纤维体积含量为60%左右的单向带材料在零吸胶固化过程中上树脂将分担全部外压。

上述试验结果及理论分析说明,对纤维体积含量为60%左右的单向带材料,在热压罐零吸胶工艺下,当树脂处于较好的流动状态时,树脂压力与铺层压力具有等效性,通过树脂压力测试的方法分析硬模传递压力的效果

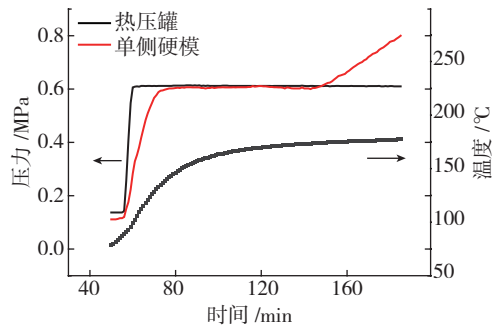


图6 阶梯加压制度下单侧硬模传压区树脂压力测试曲线

Fig.6 Resin pressure measurement curve of one side mold area in step pressurization cycle

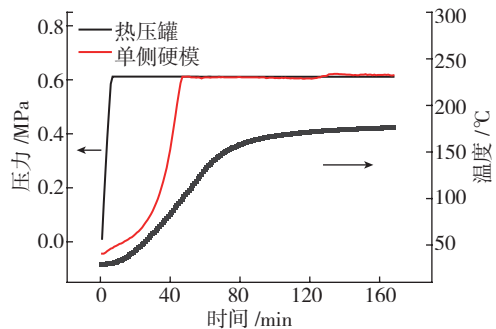


图7 标准固化制度下单侧硬模传压区树脂压力测试曲线

Fig.7 Resin pressure measurement curve of one side mold area in standard curing cycle

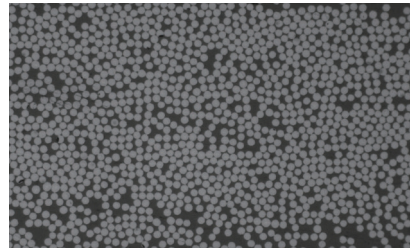


图8 977-2/IMS单向层板的微观结构照片

Fig.8 Micrographs of 977-2/IMS unidirectional laminate

是可行的。

### 2.2 硬模传压有效性及均匀性分析

双侧硬模传压区,由于存在材料厚度偏差、铺层位置偏差、模具型面偏差,硬模传压的有效性及其均匀性有待进一步分析与验证。

图9、图10分别为在阶梯加压制度与标准固化制度下,双侧硬模传压区不同厚度位置处的树脂压力测试曲线。可见,两种测试制度下,树脂压力均随罐压增加而增大,在测试点1与测试点2处,树脂压力达到罐压后继续增大,随后又逐渐降低,平衡后与罐压一致;在测试点3处,树脂压力逐渐增大至与罐压一致,并不存在过冲现象。

977-2/IMS预浸料单层厚度公差为4.8%,且铺贴后的料层厚度要比固化后的名义厚度大10%左右,同

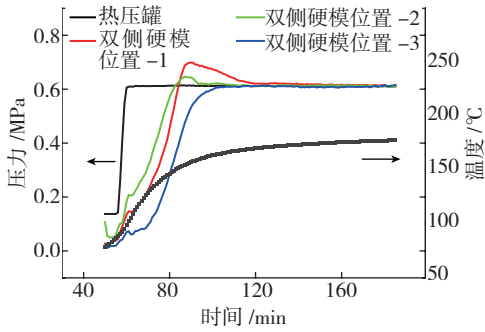


图9 阶梯加压制度下双侧硬模传压区树脂压力测试曲线

Fig.9 Resin pressure measurement curve of two side mold area in step pressurization cycle

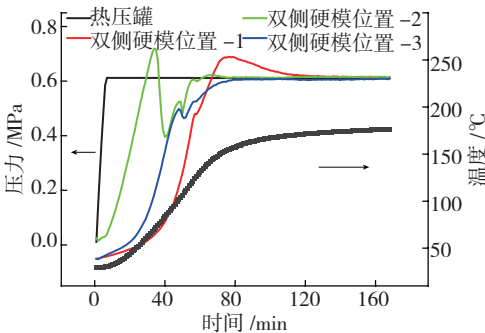


图10 标准固化制度下双侧硬模传压区树脂压力测试曲线

Fig.10 Resin pressure measurement curve of two side mold area in standard curing cycle

时模具型面差异、铺层位置偏差等因素均不可避免的存在,见图 11 (a); 在固化初期,铺层的局部区域会先与硬模接触,由于接触面积小,先与模具接触位置的压力会超过罐压,如图 11(b)中所示;随着固化温度升高,预浸料铺层被逐渐压实,同时树脂流动性增大,逐渐达到载荷平衡状态,此时,各处压力会逐渐趋于一致,如图 11 (c)所示;固化后,零件外型面与硬模配合区的型面一致,由于模具型面偏差的存在,虽然制件所受压力一致,但零件的厚度会存在一定偏差,如图 11 (d)所示。

通过上述试验结果及分析说明,当材料厚度偏差、铺贴位置偏差、模具型面偏差在合理的范围内时,随固化过程进行,硬模配合区域的树脂压力会存在载荷平衡的过程,达到平衡后与外压一致,说明此时铺层压力与外压一致,证明了硬模传压的有效性及其均匀性。

### 2.3 测试制度对树脂压力影响分析

通过图 6 与图 7,图 9 与图 10 可以看出,在试验选取的两种测试制度下,标准固化制度下的树脂压力要滞后于阶梯加压制度,并且标准固化制度下的树脂压力在增大过程中存在波动,这说明在阶梯加压制度下测试树脂压力时,由于温度升高,树脂黏度降低后测得的树

脂压力更能准确、稳定地反映铺层压力。然而,与测试系统标定曲线(见图 3)相比,阶梯加压制度下的树脂压力仍明显滞后于罐压。这是由于试验中采用热电偶检测零件的温度,为避免热电偶对硬模配合区树脂压力测试的影响,热电偶只放在单侧硬模传压的缘条区。试验中的阶梯加压制度为温度升至 90°C 后开始加压,因在 90°C 时,977-2 树脂黏度为 25Pa·s 左右(见图 12),此时

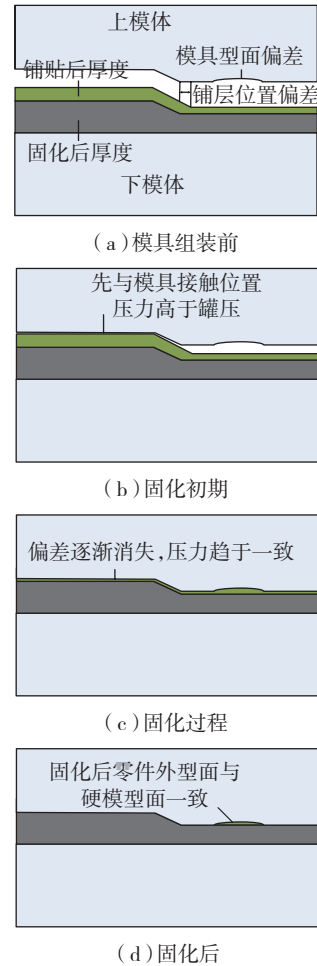


图11 固化过程中双侧硬模区树脂压力分析示意图

Fig.11 Analysis diagram of resin pressure in two-side mold area during curing

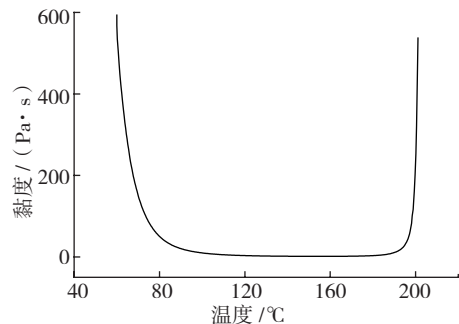


图12 977-2树脂黏温曲线

Fig.12 Viscosity-temperature curve of 977-2 resin

树脂压力测试值可较准确地实时反映铺层压力<sup>[6]</sup>。由于零件结构及尺寸、模具形式的影响,不同位置处的温度会相差较大。实际上,阶梯加压制度下,当开始加压时,双侧硬模间的温度还未升到90℃,树脂还未具有较好的流动性,因此阶梯加压制度下的测试值与罐压相比也会出现明显的滞后。

在进行理论研究时,为实时了解铺层压力与外压的关系,可以通过无固化剂的低黏度树脂刷涂织物自制预浸料进行树脂压力测试。在对工程应用的具体零件进行树脂压力测试时,由于材料单层厚度的差别,很难使用自制预浸料进行测试,只能使用本体材料在等比件或缩比件中进行模具传压的有效性验证。由于实际零件及工装结构形式复杂,工装热分布存在一定差异,同一测试时刻不同位置处的温度不同,从而树脂黏度存在差异,会造成不同位置处树脂压力测试结果并不同步,甚至出现明显滞后。对热分布差异较大的零件,在同时进行多处树脂压力测试以分析硬模传压效果时,很难根据某一位置处的温度值作为加压时机基准,若以升温较快区域的温度为基准,则升温较慢区域会存在滞后,若以升温较慢区域的温度为基准,则升温较快区域的树脂低黏度测试时间较短,可能错过压力的变化区间。

在达到载荷平衡后,树脂压力的测试值可直观反映铺层压力,进而可以验证模具传压的有效性及其均匀性。标准固化制度下进行测试时,虽然在较低温度下的树脂压力并不是铺层压力的实时反映,且在增大时存在一定波动,但当树脂黏度降到一定程度时的树脂压力均可以反映铺层压力,并且低黏度测试区间均较长,有利于整体了解过程中的铺层压力变化。因此考虑到零件尺寸及工装的复杂性,在进行实际零件的硬模传压验证时,建议采用标准固化制度进行树脂压力测试。

### 3 结论

(1) 热压罐零吸胶工艺下预浸料的树脂压力与铺层压力具有等效性。通过树脂压力测试的方法分析铺层压力与罐压的差异是可行的。

(2) 试验中,双侧硬模传压区域的树脂压力存在载荷平衡的过程,在稳定后不同区域的树脂压力均匀并与罐压一致,说明当材料厚度偏差、铺贴位置偏差、模具型面偏差在合理的范围内时,双侧硬模传压是有效且均匀的。

(3) 对分析热分布差异较大的零件的硬模传压效果,在使用本体预浸料的情况下,建议采用标准固化制度进行树脂压力测试的方法。

### 参考文献

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1):1-12.  
DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.
- [2] CAMPBELL F C, MALLOW A R, BROWNING C E. Porosity in carbon fiber composites an overview of causes[J]. Journal of Advanced Materials, 1995, 26(4): 18-33.
- [3] CAMPBELL F C. Manufacturing processes for advanced composites[M]. Oxford: Elsevier, 2004.
- [4] LYNCH K, HUBERT P, POURSAITIP A. Use of a simple, inexpensive pressure sensor to measure hydrostatic resin pressure during processing of composite laminates[J]. Polymer Composites, 1999, 20(4): 581-593.
- [5] 顾轶卓, 张佐光, 李敏. 复合材料热压成型过程的树脂压力在线测试系统[J]. 复合材料学报, 2007, 24(2): 23-27.  
GU Yizhuo, ZHANG Zuoguang, LI Min. Resin pressure measuring system for hot pressing process of composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(2): 23-27.
- [6] 辛朝波, 徐吉峰, 顾轶卓, 等. 热压罐工艺树脂压力测试系统适用性实验研究[J]. 复合材料学报, 2013, 30(5):74-78.  
XIN Chaobo, XU Jifeng, GU Yizhuo, et al. Experimental study on the applicability of resin pressure measuring system during autoclave process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(5): 74-78.
- [7] XIN C B, LI M, GU Y Z, et al. Study on the resin flow and fiber compaction of tapered composite laminates during autoclave processing[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2011, 30(16): 1399-1411.
- [8] GU Y Z, XIN C B, LI M, et al. Resin pressure and resin flow inside tapered laminates during zero-bleeding and bleeding process[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2012, 31(4): 205-211.
- [9] 孙凯, 李敏, 顾轶卓, 等. 热压罐零吸胶工艺树脂压力在线测试及其变化规律[J]. 复合材料学报, 2010, 27(4):94-99.  
SUN Kai, LI Min, GU Yizhuo, et al. Study on resin pressure evolution and void formation during autoclave zero-bleeding process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2010, 27(4): 94-99.
- [10] GUTOWSKI T G, MORIGAKI T C. The consolidation of laminate composites[J]. Journal of Composite Materials, 1987, 21(2): 173-188.
- [11] DAVE R, KARDOS J L, DUDUKOVIC M P. A model for resin flow during composite processing: Part I—general mathematical development[J]. Polymer Composites, 1987, 8(1): 29-38.
- [12] DAVE R. A unified approach to modeling resin flow during composite processing[J]. Journal of Composite Materials, 1990, 24(1): 22-41.
- [13] 龚颖, 张佐光, 顾轶卓, 等. 热压工艺参数对单向复合材料层板密实状态的影响[J]. 复合材料学报, 2006, 23(1):12-16.  
GONG Ying, ZHANG Zuoguang, GU Yizhuo, et al. Effects of hot pressing process on fiber compaction of unidirectional composite laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(1): 12-16.

(责编 溥山)