

DOI:10.16356/j.1005-2615.2018.01.004

# 模具材料对复合材料制件固化过程应变的影响分析

杨晓波<sup>1</sup> 湛利华<sup>2</sup> 蒋成标<sup>2</sup> 张泳安<sup>1</sup> 胡健<sup>1</sup>

(1. 中南大学机电工程学院, 长沙, 410083; 2. 中南大学轻合金研究院, 长沙, 410083)

**摘要:** 复合材料热压罐固化工艺过程中, 制件的固化变形依旧是影响成形质量的重要原因。通过光纤光栅和热电偶相结合的方法对复合材料制件在热压罐成形工艺过程中的温度和应变进行在线监测, 研究了树脂基体对制件应变的影响规律, 并基于此分析了不同模具材料对制件固化过程应变和固化变形的影响。试验结果表明: 树脂与模具是复合材料固化过程应变变化的主要影响因素, 在升温/保温阶段, 树脂的流动、热膨胀、固化反应等是应变变化的主要原因, 而在降温阶段模具收缩对应变变化起主导作用; 不同模具材料的刚度、与制件的结合能力以及热膨胀系数的变化会在复合材料固化过程的不同阶段对应变变化产生较大影响。本文获得了不同材质模具试验条件下复合材料制件固化过程中的应变曲线, 分析了固化过程中模具对复合材料制件内部应变的影响规律, 为深入分析大型复合材料构件固化变形提供了理论支撑。

**关键词:** 复合材料; 固化应变; 模具材料; 光纤光栅

**中图分类号:** TB332      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-2615(2018)01-0024-06

## Influence of Mould Materials on Curing Process and Deformation of Composite Part

YANG Xiaobo<sup>1</sup>, ZHAN Lihua<sup>2</sup>, JIANG Chengbiao<sup>2</sup>, ZHANG Yong'an<sup>1</sup>, HU Jian<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha, 410083, China;  
2. China Light Alloys Research Institute, Central South University, Changsha, 410083, China)

**Abstract:** During the curing process of composite in autoclave, the curing deformation of the workpiece is still an important factor affecting the quality of forming. By using fiber Bragg grating and thermocouple sensors, the temperature and strain of composite part are monitored on line during the autoclave curing process. The influence law of resin matrix on strain in part is studied, and based on this, the influence of different mould materials on strain in composite curing process is analyzed. Experimental results show that resin and mould are the main influence factors of strain variation in composite materials curing process: On temperature rising and holding stage, the strain variation is caused by the resin flow, thermal expansion and curing reaction, while the mould contraction will contribute most to the strain variation on the cooling stage. The change of stiffness, binding capacity with parts and thermal expansion coefficients of different mould materials will affect the strain variation in different stages of composite curing process. The curing strain curves of composite material parts under the curing process with different material moulds are obtained, the influence of different mould materials on strain in composite curing process is analyzed, and the conclusions have instruction significance to large composite parts curing deformation for further analysis.

**Key words:** composite; curing strain; mould materials; fiber Bragg grating

**基金项目:** 国家重点基础研究计划(“九七三”计划)(2014CB046502)资助项目。

**收稿日期:** 2017-11-13; **修订日期:** 2018-01-05

**通信作者:** 湛利华, 女, 博士, 教授, E-mail: yjs\_cast@csu.edu.cn.

**引用格式:** 杨晓波, 湛利华, 蒋成标, 等. 模具材料对复合材料制件固化过程应变的影响分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(1): 24-29. YANG Xiaobo, ZHAN Lihua, JIANG Chengbiao, et al. Influence of mould materials on curing process and deformation of composite part[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(1): 24-29.

碳纤维增强树脂基复合材料具有高的比强度和比刚度、耐腐蚀和抗疲劳性能等优点,在航空航天领域得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。复合材料热压罐热压固化工艺过程中,制件的固化变形依旧是影响成形质量的重要原因。其中,制件内部存在残余应力,脱模后制件内部的部分或全部残余应力得到释放,从而引起制件的回弹或翘曲变形,最终影响制件的装配精度<sup>[3-5]</sup>。并且,复合材料内部的纤维与树脂基体热膨胀系数不匹配、树脂固化收缩以及模具与制件的相互作用等是引起制件固化变形的主要因素<sup>[6-9]</sup>,而模具与制件的相互作用引起的制件变形对复合材料制件固化质量的影响尤为显著。

针对模具对复合材料制件固化变形,国内外相关学者进行了大量研究。岳广全等<sup>[10]</sup>通过光纤光栅监测法,得到了在金属模具影响下复合材料制件沿厚度方向和面内的固化应变,发现固化应变和残余应变沿制件厚度方向呈梯度分布,模具与制件之间的相互作用对制件沿垂直纤维方向上的影响要远小于沿纤维方向。田恒等<sup>[11]</sup>利用光纤光栅传感器监测了预浸料上、中、下 3 个不同厚度位置中平行于碳纤维方向上的残余应力变化情况。Twigg 等<sup>[12]</sup>将应变片贴在铝制模具上,获得了固化过程中模具不同点处的应变变化,发现在固化的大部分时间中,制件与模具之间为滑动摩擦状态,而在固化后期,模具与制件之间会发生粘接,并且两种不同状态下的模具与制件之间所能传递的最大剪切应力相差很大。Kaushik 等<sup>[13]</sup>利用自制的实验装置模拟热压罐工艺环境,通过测量固化过程中模具与制件之间的动态和静态摩擦系数来研究模具-制件相互作用,发现树脂固化度和升温速率对模具-制件相互作用、树脂固化收缩、树脂/复合材料性能以及残余应力和界面失效模式有一定影响,与界面摩擦系数形成一定的函数关系。Sarrazin 等<sup>[14]</sup>分别使用铝制模具和陶瓷模具来研究不同模具材料对制件固化变形的影响,发现在两种不同模具材料实验条件下固化对制件变形几乎没有影响。

然而在复合材料制件实际生产中,尤其是对于复杂结构件的制造,要求使用多种不同材料的成形模具共同成形。目前,关于模具材料对制件固化过程应变以及最终的固化变形研究较少,并且从国内外的研究现状来看,相关成果还缺乏统一性。因此,开展复合材料制件固化过程中模具材料对其应变的影响规律研究,具有十分重要的科学和工程意义。本文通过对复合材料制件在热压罐固化工艺中的温度和应变进行实时监测,利用光纤光栅应变传感器监测法,获得了不同材质模具试验条件下复合材料制件固化过程中的应变曲线,分析了固化过

程中模具对复合材料制件内应变的影响规律。

## 1 试 验

### 1.1 试验设备

复合材料制件采用热压罐热压工艺成形,热压罐由大连樱田机械制造有限公司生产,最大试件尺寸为 435 mm×350 mm×600 mm。光纤光栅解调仪由上海真光信息科技有限公司生产,具体型号为:ZenOptics 960C。选未封装的光纤光栅传感器作为应变传感器,其温度灵敏系数为 0.009 5 nm/°C,应变灵敏系数为 0.001 2 nm/ $\mu\epsilon$ 。

### 1.2 试验材料

试验中采用 3 种不同材料模具:钢制模具(热膨胀系数为  $12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ),铝制模具(热膨胀系数为  $24 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ),单向层合板复合材料模具(纤维方向上的热膨胀系数为  $0.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )。模具尺寸均为 200 mm×200 mm×2 mm(长×宽×厚)。

制件材料为 T700/YPH-23 碳纤维/环氧树脂预浸料,树脂含量 33%,昆山裕博复合材料有限公司生产。其中 T700 碳纤维热膨胀系数为  $-0.38 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,环氧树脂热膨胀系数为  $59 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。

### 1.3 光纤光栅应变传感器工作原理

光纤光栅是通过位相掩模技术,使光纤纤芯折射率在轴向发生周期性调制,从而实现只对特定波长的光进行反射的特性。根据耦合理论,反射中心波长的特征方程为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Delta \quad (1)$$

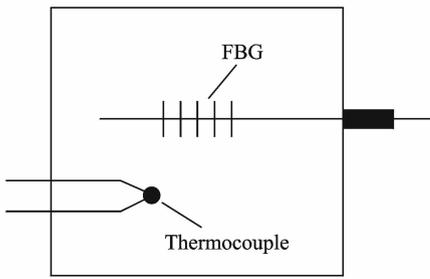
式中: $\lambda_B$  表示布拉格中心波长; $n_{\text{eff}}$  表示栅区纤芯的有效折射率; $\Delta$  为栅格周期。

当环境温度和应变发生变化时,在热光效应和光弹效应的作用下,光纤光栅的反射中心波长会发生漂移。当应变和温度同时发生作用时,反射中心波长的变化量  $\Delta\lambda$  可表示为

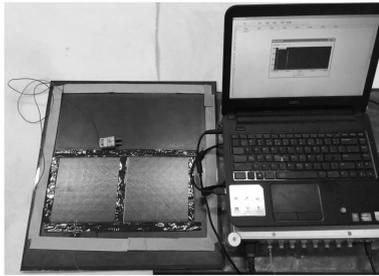
$$\Delta\lambda = K_\epsilon \Delta\epsilon + K_T \Delta T \quad (2)$$

式中试验中光纤光栅对温度和应变都较敏感,单独一个光纤光栅传感器的温度与应变共同造成的波长漂移很难区分。因此,本试验使用自制 K 形热电偶监测制件固化过程中的温度变化,并对光纤光栅进行温度补偿,用以解决光纤光栅温度和应变交叉敏感问题。

图 1 为热电偶和光纤光栅传感器在预浸料中的安放位置示意图。由于热电偶尺寸相对于制件较小,两个传感器位置相近,可认为在同一水平面上制件中温度场基本均匀,即两者温度历程相同。因而,热电偶能获得应变监测点处的温度曲线,同



(a) Schematic of sensors' location



(b) Photo of sensors' location

图1 传感器铺放位置图

Fig. 1 Location of sensors

0.6 MPa,当固化结束后温度降至 70 °C 时卸压。整个固化过程均对工装保持真空状态,两次升温阶段升温速率均为 4 °C/min。

表1 试验参数

Tab. 1 Parameters for test

序号	铺层信息	模具材料
1	[0 <sub>5</sub> /FBG/0 <sub>5</sub> ]	无模具
2	[0 <sub>9</sub> /FBG/0]	复合材料
3	[0 <sub>9</sub> /FBG/0]	钢
4	[0 <sub>9</sub> /FBG/0]	铝

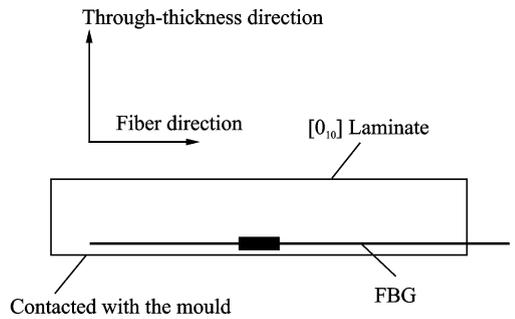


图2 制品中光纤光栅位置图

Fig. 2 Location of FBG in composite part

时不会影响光纤光栅监测点附近的应变变化。

通过式(3)剔除波长变化中温度的影响,得到监测点处的应变

$$\Delta\epsilon = (\Delta\lambda - K_T\Delta T)/K_\epsilon \quad (3)$$

#### 1.4 试验方法

为深入研究热压罐固化成形过程中模具材料对制品固化应变的影响,本文使用光纤光栅和热电偶相结合的方法监测了复合材料制品在不同固化试验中固化应变的变化情况。复合材料制品为 [0]<sub>10</sub> 单向板,尺寸为 200 mm × 200 mm × 1.25 mm(长×宽×厚),在恒温、恒湿的室内环境中手工铺层,制品铺贴完成须进行抽真空处理,用以消除铺贴过程中预浸料层间间隙。

本文涉及 4 组试验,具体参数如表 1 所示。试验 1 为复合材料制品的无模具固化试验,将光纤光栅和热电偶置于第 5、6 层预浸料之间,光纤方向与碳纤维平行,以监测复合材料构件沿纤维方向上的固化应变。试验 2,3,4 分别采用复合材料模具、钢制模具、铝制模具,为便于研究模具材料对固化应变的影响,将两种传感器置于第 9、10 层预浸料之间,其中第 10 层预浸料与模具相接触,光纤光栅同样与碳纤维平行,如图 2 所示,图中 FBG 表示光纤光栅传感器(Fiber Bragg grating)。

4 次试验使用相同固化工艺,如图 3 所示。制品由常温加热至 80 °C,保温 40 min 后继续升温至 130 °C,保温 90 min,后随罐体空冷。其中,当工艺温度达到 30 °C 时罐内开始加压,压力保持为

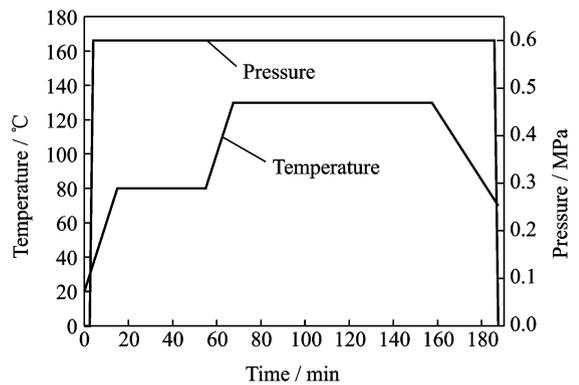


图3 热压罐工艺曲线

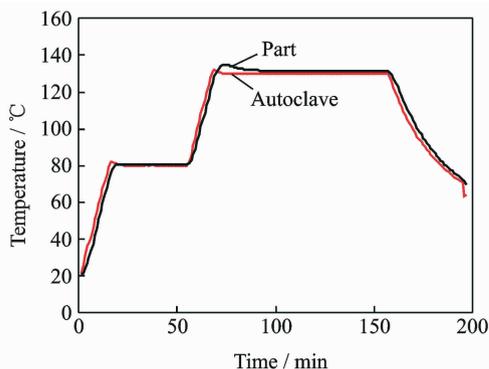
Fig. 3 Process curves of autoclave

## 2 试验结果与分析

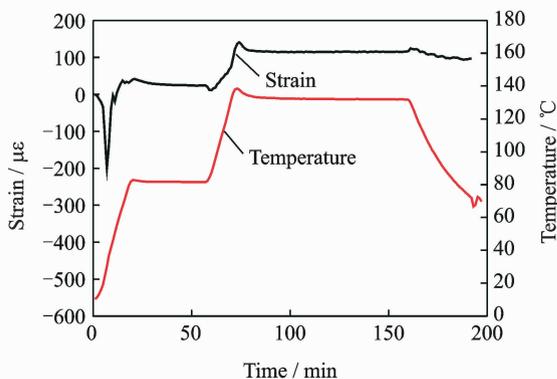
### 2.1 无模具条件下的应变监测及结果分析

图 4(a)为复合材料制品在无模具固化成形条件下,制品温度曲线与罐内温度曲线的对比结果。由图可知,在第 1 级的升温及保温阶段、第 2 级的升温阶段、全程的降温阶段,制品温度相对罐内温度稍有滞后,两者温度变化趋势基本相同。在二级保温阶段初期,制品温度明显高于罐内温度,最高温差高达 4 °C,这主要是由于复合材料内部树脂基体发生剧烈固化反应大量放热导致。随着固化过程进入保温阶段,两者温度逐渐接近,温差减小。

在无模具固化成形的试验中,沿碳纤维方向上的应变监测曲线如图 4(b)所示。可以发现,在 30 °C 加压点处,制件在固化压力作用下被压实,沿纤维方向的应变出现了一 200  $\mu\epsilon$  的压应变。随着温度升高,树脂逐渐转变为粘流态,黏度逐渐降低、流动性增大,同时树脂与 FBG 传感器之间不能形成足够强的界面,两者之间的应力传递作用减弱,使得光纤光栅传感器逐渐由受压状态恢复正常,在监测结果上表现为压应变值逐渐减小至 0 左右。



(a) Temperature curves of autoclave and part



(b) Temperature and strain curves of part

图 4 无模具条件下温度和应变随时间变化曲线

Fig. 4 Temperature and strain as a function of time in no-mould condition

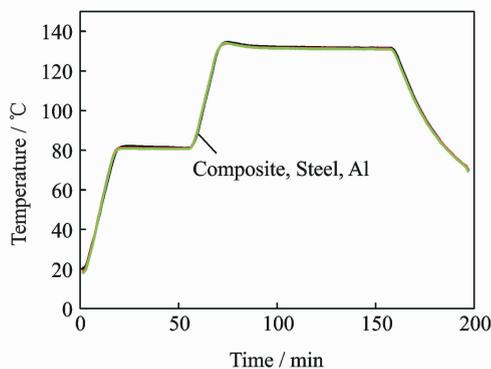
随着固化工艺进入第 2 级升温阶段,可观察到应变在升温开始出现了小幅下降,一般认为树脂在此处发生凝胶,随着温度升高,树脂逐渐由黏流态转变为橡胶态,树脂能够有效地将应力传递到光纤上,使 FBG 传感器做出响应,这与李雪芹等<sup>[15]</sup>观察到的试验结果相似。随着固化温度的升高,应变值不断增大,在二级保温阶段光纤光栅传感器监测到了 115  $\mu\epsilon$  的拉应变。树脂已转变为橡胶态,此时树脂基体的热膨胀、固化反应及流动是复合材料制件内部产生固化应变的主要原因。随着固化工艺继续推进,玻璃化转变温度因持续的交联而提高,直到达到第 2 级保温温度,树脂基体将由橡胶态转变为玻璃态,碳纤维与树脂的结合增强,从而

抑制树脂的热膨胀,整个体构件的热膨胀系数会变小。因此在降温阶段,制件固化应变变幅度较小,降幅只有 30  $\mu\epsilon$ 。对比二级的升温阶段和降温阶段的应变曲线可知,相较于降温阶段,升温阶段时温度的变化对应变影响更为显著。这表明树脂处于橡胶态时碳纤维的增强作用相比于玻璃态下要弱,树脂的固化度会影响纤维与树脂的结合性。

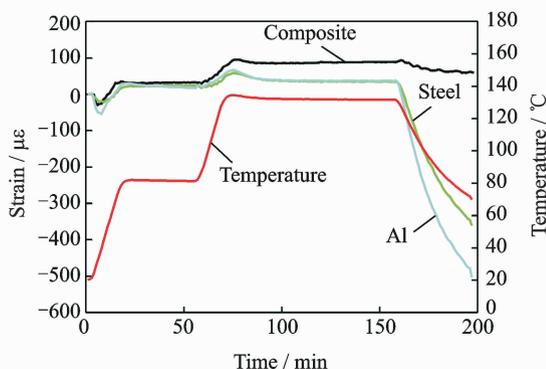
## 2.2 3 种不同模具材料条件下的应变监测及结果分析

图 5(a)为 3 种不同模具材料条件下复合材料制件固化成形过程中的温度曲线。可以看出,不同模具材料条件下,制件温度曲线基本相同。这表明模具、制件尺寸较小时,且热压罐内部稳定地提供压力与温度环境时,模具材料属性对监测点处的温度变化影响较小。

图 5(b)为在 3 种模具材料下,复合材料制件固化过程中沿纤维方向上的应变监测曲线。表 2 为在 30 °C 加压点处,4 组试验中出现的最大压应变。可以看出,在无模具试验中压应变最大为一 200  $\mu\epsilon$ ,铝制模具试验次之,为一 53  $\mu\epsilon$ ,复合材料模具和钢制模具试验中应变值相近,分别为一 29  $\mu\epsilon$ 和一 22  $\mu\epsilon$ 。导致这种现象发生的主要原因是模具的使用会抑制罐内压力对制件的压实作



(a) Temperature curves of part



(b) Strain curves of part

图 5 3 种模具材料条件下温度和应变随时间变化曲线  
Fig. 5 Temperature and strain as a function of time in three kinds of mould material conditions

表 2 4 组试验加压阶段最大应变值和一级保温阶段应变值

Tab. 2 The maximum strain in pressure process and strain in the 1st holding process in four tests  $\mu\epsilon$ 

模具材料	加压阶段	一级保温阶段
无模具	-200	28
复合材料	-29	31
钢	-22	24
铝	-53	24

用, 模具刚度越大, 抑制作用越明显, 而铝制模具的刚度在 3 种模具中最小。因此, 在铝制模具条件下的压实作用要比钢制模具和复合材料模具大。

一级升温阶段, 随着温度升高, 树脂逐渐转变为黏流态, 黏度逐渐降低、流动性增大, 3 组试验中压应变均会随着树脂流动不断减小。固化工艺进入一级保温阶段时, 4 组试验中固化应变分别为  $28 \mu\epsilon$  (无模具试验),  $31 \mu\epsilon$  (复合材料模具试验),  $24 \mu\epsilon$  (钢制模具试验) 和  $24 \mu\epsilon$  (铝制模具试验), 各组试验在这一阶段的应变值相差不大。这说明树脂处于黏流态时, 模具材料属性对复合材料制件固化过程中的应变的影响很小, 而树脂流动是造成复合材料制件固化过程应变变化的主要因素。

二级升温阶段, 3 组有模具试验的应变监测值均出现不同程度增大, 当固化工艺进入二级保温阶段, 在保温初期, 剧烈的交联反应使树脂基体收缩, 应变值有所降低, 随着树脂基体由橡胶态转变为玻璃态, 固化反应终止, 制件内部的应变将保持稳定。从表 3 中可知, 在二级保温阶段应变值最大的为  $115 \mu\epsilon$  (无模具试验), 在有模具试验中复合材料模具试件应变最大, 为  $88 \mu\epsilon$ , 铝制和钢制模具试验中应变值最小, 分别为  $37 \mu\epsilon$  和  $35 \mu\epsilon$ 。而 4 组试验的应变值在一级保温阶段相差不大, 在二级保温阶段 4 组试验之间出现的应变梯度是由二级升温阶段产生的, 而无模具试件应变显著大于有模具试验中的制件应变, 这表明树脂流动、热膨胀等是复合材料制件固化应变增长的主要因素, 模具的使用反而会抑制应变的增长。然而, 模具的抑制效果与模具本身热膨胀系数之间的关系并不明显, 这是由于树脂处于玻璃态时制件与模具之间处于滑动摩擦状态<sup>[12]</sup>, 两者之间所能传递的最大界面剪切应力是决定模具抑制效果的主要原因。从结果上可以看出, 金属模具的抑制效果相较于复合材料模具更强。

随着固化工艺继续进行, 降温阶段时树脂基体处于玻璃态, 碳纤维和树脂的结合作用显著增强, 碳纤维能够有效抑制树脂的收缩, 固化后的复合材

表 3 4 组试验二级保温过程应变值和降温过程最大应变值

Tab. 3 Strain in the 2nd holding process and the maximum strain in cooling process in four tests  $\mu\epsilon$ 

模具材料	二级保温阶段	降温阶段
无模具	115	85
复合材料	88	60
钢	35	-361
铝	37	-502

料制件的热膨胀系数相对树脂基体很小。在这一阶段, 模具与制件处于“粘接”状态<sup>[12]</sup>, 降温时, 热膨胀系数较小的复合材料制件会随模具收缩, 使制件内部拉应变降低, 甚至转变为压应变。表 3 列出了 4 组试验在降温阶段的最大应变值, 铝制模具试验中制件应变值最大, 为  $-502 \mu\epsilon$ , 并且其在降温阶段的应变变幅度也为最大, 为  $539 \mu\epsilon$ ; 钢制模具应变稍小, 为  $-361 \mu\epsilon$ , 应变变幅度为  $396 \mu\epsilon$ ; 而无模具试验和复合材料模具试验中制件应变皆为拉应变, 分别为  $85 \mu\epsilon$  和  $60 \mu\epsilon$ , 应变变幅度也相近, 分别为  $30 \mu\epsilon$  和  $28 \mu\epsilon$ 。这表明模具材料热膨胀系数的大小会显著影响制件应变在降温阶段的变化, 与复合材料制件热膨胀系数相差最大的铝制模具对制件应变影响最大, 热膨胀系数相差最小的复合材料模具对复合材料制件应变影响最小, 即降温阶段模具与制件因热膨胀系数不同引起的相互作用是制件应变变化的主要因素, 且模具热膨胀系数与复合材料制件热膨胀系数相差越大, 影响相应越大。

### 3 结 论

(1) 通过光纤光栅应变传感器监测法实现了复合材料制件在热压罐固化工艺中的温度和应变的实时监测, 明确了在固化升温/保温阶段, 树脂自身的流动、热膨胀、固化反应等产生的流变是引起制件应变变化的主要原因, 而在降温阶段不同模具材料与制件之间的热膨胀系数不匹配是制件应变变化的主要因素。

(2) 第一级升温阶段, 模具的使用会抑制制件的压实效果, 且模具刚度越大, 抑制效果越明显; 第二级升温阶段, 模具与制件之间的最大界面剪切应力会因材料而异, 最终影响其对应变增长的抑制作用; 而在降温阶段, 模具材料热膨胀系数的不同会显著影响应变演变, 模具材料与复合材料制件之间的热膨胀系数相差越大, 对其降温阶段的应变演变的影响也越大。

(3) 固化结束后, 试验使用的模具材料热膨胀

系数越大,制件内的压应变也越大,最终导致的固化变形也越大;铝制模具和钢制模具试件应变分别为 $-502\ \mu\epsilon$ 和 $-361\ \mu\epsilon$ ,复合材料模具试件应变为 $60\ \mu\epsilon$ 。

### 参考文献:

- [1] 陈绍杰. 复合材料技术与大型飞机[J]. 航空学报, 2008,29(3):605-610.  
CHEN Shaojie. Composite technology and large aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008,29(3):605-610.
- [2] 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 material and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007,24(1):1-12.
- [3] SHEN X Y. Cure monitoring of composites based on embedded fiber Bragg gratings[J]. Advanced Materials Research, 2011,211(21):585-589.
- [4] KIM S S, MURAYAMA H, KAGEYAMA K, et al. Study on the curing process for carbon/epoxy composites to reduce thermal residual stress [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012,43(8):1197-1202.
- [5] KIM H S, YOO S H, CHANG S H. In situ monitoring of the strain evolution and curing reaction of composite laminates to reduce the thermal residual stress using FBG sensor and dielectrometry[J]. Composites Part B: Engineering, 2013,44(1):446-452.
- [6] 贾丽杰. 树脂基复合材料结构固化变形的研究进展[J]. 航空制造技术, 2011(15):102-105.  
JIA Lijie. Advance in curing deformation of resin matrix composites structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(15):102-105.
- [7] TWIGG G, POURSAARTIP A, FERNLUND G. Tool-part interaction in composites processing. Part I: Experimental investigation and analytical model [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2004,35(1):121-133.
- [8] POTTER K D, CAMPBELL M, LANGER C, et al. The generation of geometrical deformations due to tool/part interaction in the manufacture of composite components[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2005,36(2):301-308.
- [9] ZENG X, RAGHAVAN J. Role of tool-part interaction in process-induced warpage of autoclave-manufactured composite structures [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010,41(9):1174-1183.
- [10] 岳广全, 张嘉振, 张博明. 模具对复合材料构件固化变形的影响分析[J]. 复合材料学报, 2013,30(4):206-210.  
YUE Guangquan, ZHANG Jiazhen, ZHANG Bom-ing. Influence of mold on cure-induced deformation of composites structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013,30(4):206-210.
- [11] 田恒, 王继辉, 冀运东, 等. 布拉格光栅监测不同厚度方向的固化残余应力[J]. 功能材料, 2012,43(19):2671-2674.  
TIAN Heng, WANG Jihui, JI Yundong, et al. The monitoring of cure-induced residual stress on different depth direction by fiber Bragg grating sensor[J]. Journal of Functional Materials, 2012,43(19):2671-2674.
- [12] TWIGG G, POURSAARTIP A, FERNLUND G. An experimental method for quantifying tool-part shear interaction during composites processing [J]. Composites Science and Technology, 2003,63(13):1985-2002.
- [13] KAUSHIK V, RAGHAVAN J. Experimental study of tool-part interaction during autoclave processing of thermoset polymer composite structure[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010,41(9):1210-1218.
- [14] SARRAZIN H, BEOMKEUM K, AHN S H, et al. Effects of the processing temperature and lay-up on springback [J]. Journal of Composite Materials, 1995,29(100):1278-1294.
- [15] 李雪芹, 周玉敬, 张子龙, 等. 光纤布拉格光栅传感器监测环氧树脂固化收缩研究[J]. 材料工程, 2012(8):73-77.  
LI Xueqin, ZHOU Yujing, ZHANG Zilong, et al. Curing shrinkage monitoring in epoxy resin by fiber Bragg grating sensors[J]. Journal of Materials Engineering, 2012(8):73-77.

