

# 复合材料构件热压罐成型 温度场研究

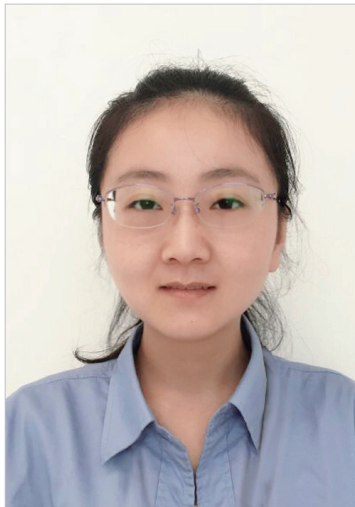
杨云仙, 刘 军, 周 敏, 戚经革

(中国商飞上海飞机制造有限公司, 上海 201325)

[摘要] 在热压罐固化工艺的热历程中, 复合材料零件表面温度场分布的合理与否将直接决定产品的固化质量。以工字型零件和 T 型加筋壁板两种复合材料零件为研究对象, 使用 EC-3×8M 和 SCH-5.5×21M 两种型号热压罐, 同时选择炉温偶和零件偶两种控温方式对零件进行固化。通过分析温度场测试结果发现, 控温方式、设备加热方式、升降温速率、热电偶的摆放位置、固化压力等因素均对零件的温度场有影响。

关键词: 复合材料; 热压罐成型; 控温方式; 温度场

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.15.082



杨云仙  
工程师, 研究方向为先进复合材料  
制造工艺。

先进复合材料在航空航天领域用量比例逐渐增多, 热压罐成型工艺作为目前制造纤维增强树脂基复合材料零件的主要方法, 固化过程中的温度场分布是非常重要的工艺控制因素。

复合材料固化使用的热压罐设

备, 升温时均以电热阻丝为加热源, 以流体介质(主要为氮气)作为传热载体, 以风机作为动力, 完成对模具循环加热过程, 降温时通过循环水带走热量。温度比较高时, 热压罐罐壁蓄热比较大, 无论是升温过程还是降温过程在罐壁和框架式模具间都会发生热辐射。固化热历程中, 热交换的传递方式包括热传导、热对流、热辐射 3 种。由于目前航空复合材料零件固化温度大部分在 200℃ 以下, 在热压罐成型工艺中热辐射的影响比较小, 传热方式主要以强迫对流换热和热传导为主。热压罐工艺成型时热源有两个: 一个是电热源(热阻

丝), 另一个是内热源(先进树脂基复合材料固化放热), 升降温过程热量传递路径如图 1 所示<sup>[1]</sup>。先进复合材料构件固化过程中的温度场属于外部温度场与内部固化反应放热的耦合温度场<sup>[2-4]</sup>。

复合材料零件在热压罐成型过程中不直接与罐内流体介质接触, 但是成型模具对其温度场的影响作用远远大于辅助材料的影响, 所以可以认为外温度场对零件的作用主要是通过模具来传递的。目前固化成型模具多为框架式结构, 实际固化过程中模具不同位置温差也不同, 导致与零件接触的模具型面温度场也在不

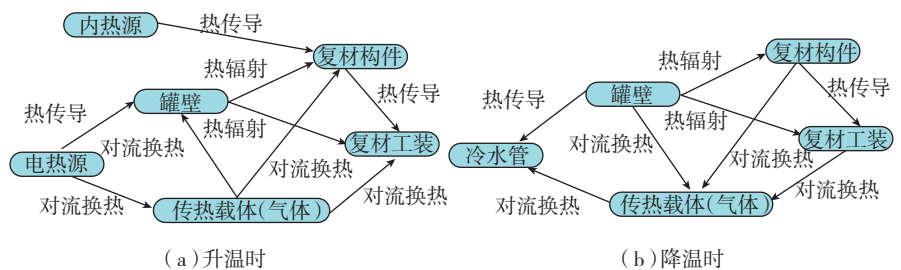


图1 热压罐工艺热量传递路径

Fig.1 Route of heat transfer in autoclave process

断变化,造成复合材料零件各部位的温度场分布不均匀,固化不同步,最终影响产品质量。

因此,研究复合材料零件固化过程中的温度场,对改进工艺条件、提高产品质量具有重要意义。在成型工艺过程中,有效控制固化成型的温度场,使零件的温度场在时间和空间上得到合理分布,可以避免复合材料产品在固化过程中的不完全固化。目前解决零件不完全固化的方法是根据现有工艺规范的要求,首先对同类型的新零件和新模具进行热分布测试,然后在所有的热电偶中选出零件的领先热电偶和滞后热电偶(一般用模具滞后热电偶代替零件滞后热电偶)。

本文以工字型零件和T型加筋壁板两种复合材料零件为研究对象,同时使用国内先进复合材料制造常用的EC-3×8M和SCH-5.5×21M两种不同型号的热压罐设备,采用两种控温方式,通过分析零件成型过程中温度场测试结果,最终得出复合材料零件固化工艺过程中温度场影响因素。

### 试验内容

#### 1 设备参数

选用EC-3×8M和SCH-5.5×21M两种型号的热压罐设备,流体介质为氮气,均以美国波音以及国际标准为验收依据,设备温度均匀性(±2℃)和升降温速率性能(0~4.4℃可调)均满足使用要求。

##### 1.1 EC-3×8M热压罐

EC-3×8M型号热压罐有效工作尺寸为φ3m×8m(图2),流体介质为氮气。与传统热压罐的加热方式不同,采用地板固定式加热器和冷却器,同时在罐门和罐尾两端用气流调整面板以改善热循环气流,加强了罐内从前到后的直线气流作用,达到罐内温度均匀性要求,同时也避免了罐体前后部分的加热死区,有效地利

用了罐内空间。

##### 1.2 SCH-5.5×21M热压罐

SCH-5.5×21M热压罐有效工作尺寸为φ5.5m×21m(图3),流体介质为氮气。该热压罐采用尾部电加热,结合主冷和独有的预冷技术,同时利用风机实现固化过程中对罐内温度场的要求。

### 2 固化工艺

本文均选用工字型零件和T型加筋壁板两种零件,材料为碳纤维/环氧树脂预浸料,分别采用炉温偶和零件偶两种控温方式固化,具体固化工艺条件如下。

#### 2.1 工字型零件

选用EC-3×8M型号热压罐。

(1)炉温偶控温,压力620kPa的条件下,以升温速率≤1.5℃/min升温至130℃,以≤2℃/min继续升温至(180±6)℃;然后保温120min;以降温速率≤2℃/min降温至100℃,以≤3℃/min降温至温度低于50℃,卸压开罐。

(2)零件偶控温,压力620kPa的条件下,以升温速率≤1.5℃/min升温至130℃,以≤2℃/min继续升温至(180±6)℃;然后保温120min;以降温速率≤2℃/min降温至100℃,以≤3℃/min降温至温度低于50℃,卸压开罐。

#### 2.2 T型加筋壁板

选用SCH-5.5×21M型号热压罐。

(1)炉温偶控温,压力620kPa的条件下,以升温速率≤2.9℃/min升温至(180±6)℃;然后保温120min;以降温速率≤2.8℃/min降温至50℃以下,卸压开罐。

(2)零件偶控温,压力620kPa的条件下,以升温速率≤1.5℃/min升温至(180±6)℃;然后保温120min;以降温速率≤1.4℃/min降温至50℃以下,卸压开罐。

## 试验结果与讨论

### 1 测试结果

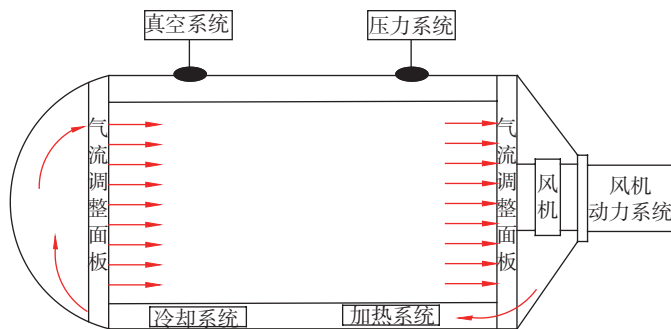


图2 φ3m×8m热压罐加热原理

Fig.2 Heating principle of the φ3m×8m autoclave

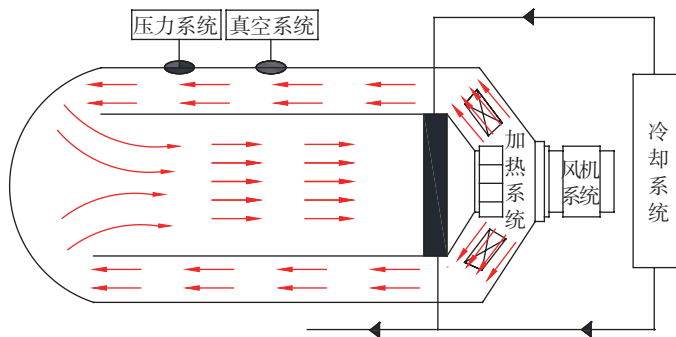


图3 φ5.5m×21m热压罐加热原理

Fig.3 Heating principle of the φ5.5m×21m autoclave

对于工字型零件和T型加筋壁板,均采用了零件偶和炉温偶两种控温方式的固化工艺,结果发现,不同固化设备以及控温方式对零件的温度场均有明显影响。与零件偶控温方式相比,炉温偶控温的最长保温时间较大,且固化温度场的温差偏大。工字型零件外形复杂且尺寸大,最长保温时间及最大温差均大于T型加筋壁板。

图4是工字型零件和T型加筋壁板的热电偶布局示意图,零件放置领先热电偶的一端均靠近罐门。工字型零件的领先热电偶放在零件缘条侧,滞后热电偶用对应的模具热电偶代替;T型加筋壁板的领先热电偶放在零件腹板侧,滞后热电偶放在缘条靠近蒙皮的一侧。

表1和表2分别是工字型零件

和T型加筋壁板固化过程工艺参数测试结果。图5和图6是两种复合材料零件的固化曲线。

## 2 结果分析与讨论

### 2.1 升降温速率对温度场影响

升降温速率作为复合材料固化质量的重要影响因素之一,其数值设定过大,会造成零件温度分布不均匀,较小又会产生过长的固化时间,因此固化升降温速率是一个需要综合考虑的因素<sup>[5]</sup>。在炉温偶控温的条件下,温度设定值指的是罐内温度,实际传到零件表面的温度必定低于设定值。为了降低工字型零件的最大温差,其升降温速率的设定值分为两步进行,两种控温方式采用相同的固化工艺参数,可以看出升降温速率不同,其保温时间也不同。对于T型加筋壁板相对来说,最长保温时间

和最大温差差别不大,这是因为炉温偶控温时,升降温速率设定值比零件偶控温时的大,在一定程度上降低了零件领先和滞后的温差。

### 2.2 设备加热方式对温度场影响

不同热压罐型号由于加热方式的不同,对固化温度场也有影响。EC-3×8M热压罐采用炉温偶控温时,升降温阶段会出现平台(图5(a)中炉温偶的两个平台),是因为变速率之前,炉温偶为了等待零件滞后偶达到设定的范围形成的。采用零件偶的控温方式,炉温会根据实际零件的温度进行升温,容易造成罐温冲温过高(图5(b)中炉温偶的两个峰值就是该原因造成的),导致零件固化温度超过工艺范围,且该过程难以控制。

SCH-5.5×21M热压罐在零件偶控温的模式下,其独有的预冷技术,可以有效地控制固化过程中零件各部位的温差,最终避免零件在到达设定温度时冲温过高。图6(b)小段的保温平台是为了缩短领先偶与滞后偶的温差,炉温暂时升高所致。

### 2.3 其他因素对温度场影响

工字型零件与T型加筋壁板相比,最大温差以及最长保温时间均偏大。这是因为一般情况下,零件外形越复杂,其领先和滞后热电偶温差越大。复合材料零件在成型过程中,其内部由于树脂基体的作用将产生复杂的固化放热反应,同时由于树脂的流动传热,使得在成型过程中出现内部温度过热,构件内部会存在温度梯度,而且随着零件厚度的增加,温度梯度增大<sup>[6]</sup>。模具热电偶的引入也会产生相应的误差,造成保温时间过长,最终影响零件的温度场。Johnston<sup>[7]</sup>等研究发现,压力也可以明显改善设备温度场的均匀性和缩短热历程时间。

此外,通过研究发现<sup>[8-10]</sup>,在升温阶段,框架式模具高温区主要分布在罐门进风端(次者在罐尾出风端),

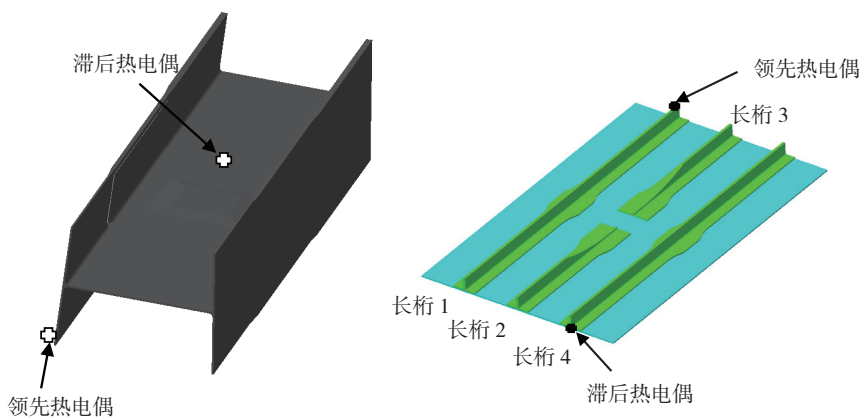


图4 工字型零件和T型加筋壁板热电偶布局示意图

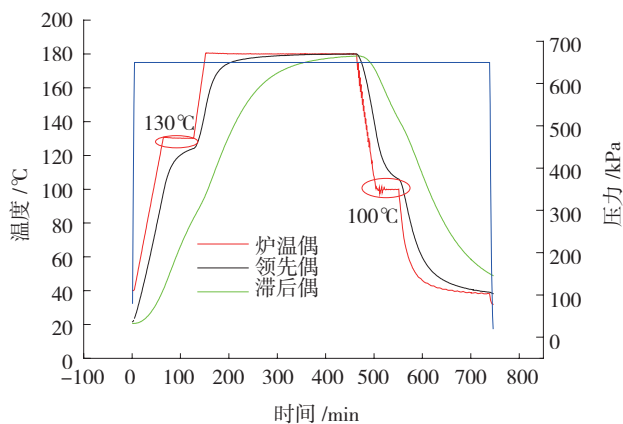
Fig.4 Schematic diagram of thermocouple layout for type I and T composite parts

表1 工字型零件固化工艺参数测试结果

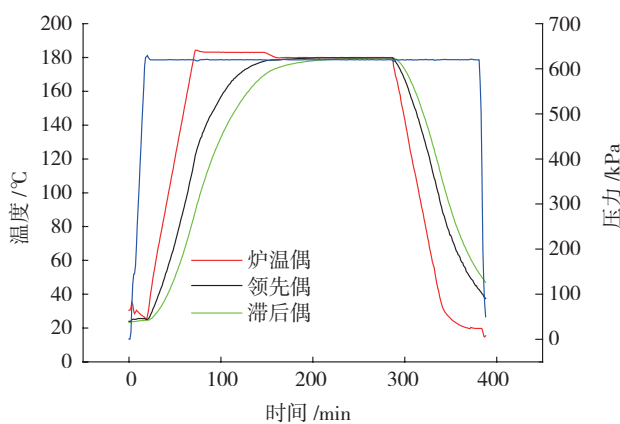
控温方式	升温速率 / (°C · min <sup>-1</sup> )	最长保温时间 /min	最大温差 /°C	降温速率 / (°C · min <sup>-1</sup> )
炉温偶	0.1~1.41	279	48.5	0.18~1.61
零件偶	0.12~1.51	254	45.3	0.13~1.93

表2 T型加筋壁板固化工艺参数测试结果

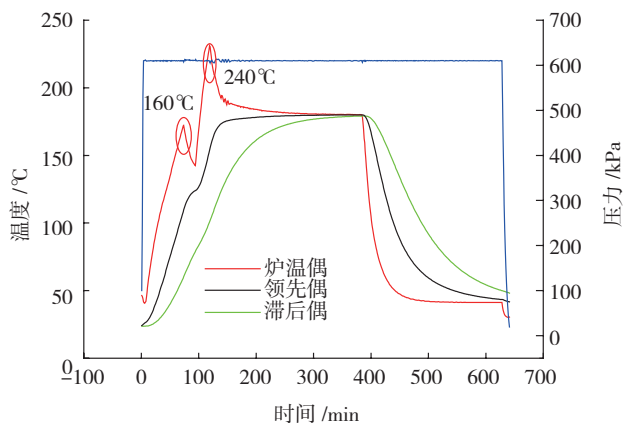
控温方式	升温速率 / (°C · min <sup>-1</sup> )	最长保温时间 /min	最大温差 /°C	降温速率 / (°C · min <sup>-1</sup> )
炉温偶	0.24~2.58	164	14	0.91~2.22
零件偶	0.34~2.0	161	13.3	0.65~1.45



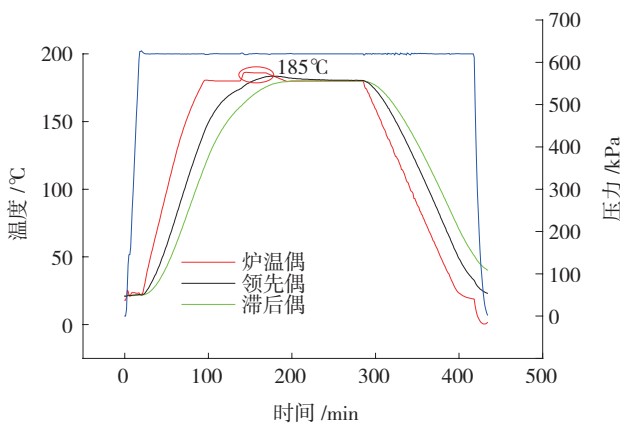
(a) 工字型零件炉温偶控温固化曲线



(a) T型加筋壁板炉温偶控温固化曲线



(b) 工字型零件零件偶控温固化曲线



(b) T型加筋壁板零件偶控温固化曲线

图5 工字型零件炉温偶和零件偶控温固化曲线  
Fig.5 Curing curve of the type I part in air and part thermocouple control

图6 T型加筋壁板炉温偶和零件偶控温固化曲线  
Fig.6 Curing curve of the type T part in air and part thermocouple control

低温区主要分布在框架式模具中间位置,模具温差较大;在保温阶段,模具温差相对比较小;在降温阶段,温度分布大体呈现与升温阶段相反的趋势,温差也比较大。由于模具的比热较大以及真空袋或透气毡等辅助材料的隔热作用,复合材料零件在靠近模具的表面和靠近真空袋的表面的温度分布完全不一样,这些因素也会造成零件各部位的温差。

### 结论

(1) 固化过程中,温度场的控温方式不同,其固化温度测试结果也不同。炉温偶控温时,构件固化温度将低于设定值。零件偶控温时,温度一般偏向等于或高于设定值;

(2) 两种型号的热压罐设备加热方式不同, SCH-5.5×21M 适合进行零件偶的控温方式,而 EC-3×8M 则适用炉温偶控温;

(3) 在工艺要求的范围内,可以适当增大罐内压力有利于改善固化温度场均匀性并缩短热历程时间;

(4) 在不影响零件固化热历程的前提下,可以选择与零件滞后最接近的模具热电偶作为固化过程的滞后偶。

总之,在实际制造过程中,对于不同的复合材料零件,需要综合考虑零件结构形式、模具结构形式、热电偶位置、零件直接接触的固化环境以及固化设备的加热方式,最终确定合适的升降温速率、固化压力、控温方

式,达到改善零件的固化质量,提高零件合格率。

### 参考文献

[1] 王永贵,梁宪珠,曹正华.热压罐工艺成型先进复合材料构件的温度场研究综述[J].玻璃钢/复合材料,2009(3):81-85.  
WANG Yonggui, LIANG Xianzhu, CAO Zhenghua. Review of the temperature field research of autoclave moulding for advanced composite components[J]. FRP/CM, 2009(3):81-85.

[2] ANTONUCCI V, GIORDAN M, IMPARATO S I, et al. Analysis of heattransfer in autoclave technology[J]. Polymer Composites, 2001, 22:613-620.

[3] CAPEHART T W, KIA H G, ABUJOUDEH T. Cure simulation of thermoset composite panels[J]. Journal of Composite

Materials, 2007, 41:1339-1360.

[4] ZHU Q, GEUBELLE P H. Dimensional accuracy of thermoset composites: shape optimization[J]. Journal of Composite Materials, 2002, 36: 647-672.

[5] 王志远, 陈刚, 郑志才. 树脂基复合材料固化过程温度场研究进展[J]. 工程塑料应用, 2010, 38(8): 85-88.

WANG Zhiyuan, CHEN Gang, ZHENG Zhicai. Review on temperature field in curing process of fiber reinforced composites[J]. Engineering Plastics Application, 2010, 38(8): 85-88.

[6] 郭战胜, 杜善义, 张博明, 等. 厚截面树脂基复合材料的温度场研究 I: 模拟[J]. 复合材料学报, 2004, 21(5): 122-127.

GUO Zhansheng, DU Shanyi, ZHANG Boming, et al. Study of temperature distribution of thick polymeric matrix composite I: simulation[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(5): 122-127.

[7] JOHNSTON A. An investigation of autoclave convective heat transfer[J]. Experimental Heat Transfer A Journal of Thermal Energy Generation Transport Storage & Conversion, 1998, 15(1): 1-18.

[8] 王永贵, 梁宪珠, 张博明, 等. 热压罐工艺的传热分析和框架式模具温度场分布[J]. 航空制造技术, 2008(22): 80-83.

WANG Yonggui, LIANG Xianzhu, ZHANG Boming, et al. Analysis of heat transfer and temperature field distribution on frame tooling in

autoclave process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(22): 80-83.

[9] 晏冬秀, 刘卫平, 黄钢华. 复合材料热压罐成型模具设计研究[J]. 航空制造技术, 2012(7): 49-52.

YAN Dongxiu, LIU Weiping, HUANG Ganghua. Design study for composite autoclave forming mould[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(7): 49-52.

[10] 朱大雷, 易茂斌, 廖敦明. 复合材料热压罐固化工艺仿真分析[J]. 宇航材料工艺, 2014, 44(1): 53-56.

ZHU Dalei, YI Maobin, LIAO Dunming. Analysis on simulation to autoclave curing process of composites[J]. Aerospace Materials & Technology, 2014, 44(1): 53-56.

## Research on Temperature Field of Composite Structure Based on Autoclave Processing

YANG Yunxian, LIU Jun, ZHOU Min, QI Jingge

(Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., COMAC, Shanghai 201325, China)

**[ABSTRACT]** The quality of composite parts is determined directly by the temperature field during the curing process. The I-stiffened panel and T-stiffened panel are studied considering two temperature-controlling methods in this paper. The results indicate that temperature-controlling methods, equipment heating-mode, heating/cooling rate, installing position of thermoelectric couples and curing pressure all have much effect on the curing temperature field of the composite parts.

**Keywords:** Composite; Autoclave processing; Temperature-controlling method; Temperature field (责编 大漠)

(上接第 81 页)

## Research Progress on Simulation During Autoclave Processing of Advanced Composites

LI Yanxia

(Key Laboratory of Aerospace Materials and Performance (Ministry of Education), School of Material Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**[ABSTRACT]** Autoclave is one of the most important manufacturing processes commonly used to fabricate composite structures with high performances in aeronautical and aerospace area. The autoclave process involves the complex interactions between multiphases and the heat and pressure, which affect the quality of composite materials. The numerical simulation for autoclave process of the composite components based on the physical and chemical mechanism is significant during the design and optimization of the tooling and process, which provides the theoretical support for developing model from the traditional "trial and error" pattern to the digital manufacturing mode. The main research progress of numerically simulation of autoclave process has been reviewed in recent years. Combined with the research status at home and abroad, some considerations for the development trends of the autoclave process and urgent problems have been taken in this paper.

**Keywords:** Advanced composite; Autoclave processing; Numerical simulation (责编 大漠)