

热压罐/真空辅助组合工艺成型 复合材料及其质量评价*

王召召^{1,2}, 潘利剑^{2,3}, 庄恒飞², 段振锦^{1,2}, 刘宇婷², 胡秀凤²

(1. 东华大学材料科学与工程学院, 上海 201620;

2. 东华大学民用航空复合材料协同创新中心, 上海 201620;

3. 东华大学上海市轻质结构复合材料重点实验室, 上海 201620)

[摘要] 综合分析热压罐工艺和真空辅助成型(VARI)工艺的优缺点,并对两种成型工艺进行优势整合,开发出新型的热压罐/VARI组合工艺;对该新型工艺成型质量包括纤维体积分数及其厚度等进行评价,并与VARI成型对比。结果显示,热压罐/VARI组合工艺制件纤维体积分数可达60%以上,并且树脂固化前的保压时间越长,纤维体积含量越大,直至纤维体积分数到达一定数值。

关键词: 热压罐;真空辅助成型;纤维体积分数;制件厚度

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.23/24.078



王召召

硕士,从事树脂基复合材料相关研究,参与项目包括大型民用客机碳纤维复合材料典型部件液体成型技术研究项目与上汽集团RTM与热压罐成型标准样条力学性能对比研究项目。

* 基金项目: 国家商用飞机制造工程技术研究中心创新基金项目(SAMC14-JS-15-049);上海市科委2014年度科技创新行动计划项目(14DZ1100402);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2232014D3-26)。

热压罐/VARI组合工艺是一种利用热压罐设备灌注树脂并在高压下成型复合材料的一种工艺方法。该技术在分析两种工艺的优势和劣势的基础上,引入新的成型理念,将热压罐成型压力高、质量好的优点与VARI成型成本低、易铺敷^[1]的优点进行结合,形成了模腔压力、热压罐压力以及实施温度三大工艺参数相互独立可控的新的液体成型工艺方法,极大地改善了VARI成型工艺纤维体积含量较低的缺点,提高了机械性能,同时大大减少了孔隙、干斑等缺陷的存在。

目前,由于类似于热压罐/VARI组合的新工艺主要应用在航空航天等高精度领域,这些领域具有较高的保密要求,因此国内外关于热压罐/VARI组合工艺的相关报道并不多见。Goodell等^[2]于2003年最早研究了热压罐和VARI工艺组合的问题,并将之命名为复合材料压力树脂

灌注系统(简称COMPRIS);德国宇航局利用SLI-RTM方法生产出了飞机整流罩^[3],这实际上也是一种热压罐和VARI组合的工艺;国内方面,居建国等^[4-5]在充分了解国际上热压罐/VARI组合技术发展状况的基础上,根据该技术的原理提出了系统方案和设计思路,并对组合工艺的优缺点进行了讨论。

本文综合了已有的热压罐/VARI组合工艺,设计出风险和成本较小的组合方案,并对该新型组合工艺进行工艺参数设计与调控;对该新型组合工艺成型质量包括纤维体积分数和厚度等进行评价,并与VARI成型工艺对比,考察该新型组合工艺的有效性。

热压罐/VARI组合工艺的设计

通过减少复合材料中树脂的量,可以达到提高纤维体积分数的目的,目前已报道的热压罐/VARI组合工

艺,均是从减少复合材料的树脂含量入手,本文的设计亦是这一角度考虑。但是,从已报道的文献来看,对热压罐设备及对应的操作系统进行了改进,这样做一方面产生了较大的额外成本,另一方面增加了操作风险,昂贵的热压罐设备也有损坏的可能。

为此,本文从成本及安全考虑设计了如图1所示的组合工艺方案。制件模腔通过特制的耐高温高压树脂收集器与真空嘴相连,在排空状态下,模腔与外部大气相通,热压罐加压后即产生压力梯度,从而将模腔中的树脂排入特制的树脂收集器中,实现纤维含量的提高。树脂未固化前压力参数的调节(排出树脂阶段)是决定组合工艺制件纤维含量及性能的关键。为此,在关闭罐门后,首先将压力升高到一定数值并保压一定时间,以便排除多余树脂。此方案既不需要改造热压罐设备,也不需要单独设计树脂注射的操作系统,只需添加一个特制的耐高温高压树脂收集器,因而和已报道的方案相比,此方案成本较低、风险较小。

热压罐/VARI组合工艺试验材料及方法

1 试验设备及材料

试验使用西安龙德科技发展有限公司生产的热压罐,有效工作尺寸为 $\phi 1\text{m} \times 2\text{m}$ 。适用于热压罐/VARI组合工艺的特制树脂收集器及其相关设备。此外,还有自动裁床(格柏科技国际有限公司, DSC-2506-24),真空烘箱(上海亦博实业有限公司, RUD-60LH)等。

试验中所用纤维织物为单向碳纤维无曲织物(NCF, C-L250-12),面密度为 $250\text{g}/\text{m}^2$ 。树脂为惠柏新材环氧树脂(ML-5417A),固化剂为惠柏新材 ML-5417B 固化剂,树脂与固化剂质量混合比例为 100:30,常温下混合黏度为 $\text{MPa} \cdot \text{s}$,固化制度

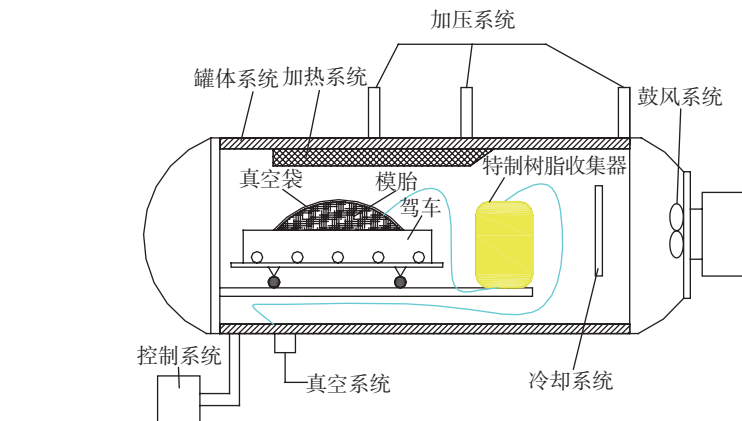


图1 热压罐/VARI组合工艺方案

Fig.1 Combination of facility for autoclave/VARI integrated molding process

为 130°C 保温2h。

2 试验方法

试验装置如图2。采用钢板为平板磨具。模具置于热压罐小推车上,清洁模具并均匀涂抹脱模剂,将已经裁剪好的纤维铺放在模具上,然后依次铺放脱模布、导流网,并用真空袋和密封胶条进行封装。封装方式与过程与VARI成型类似,封装的模腔一端是树脂入口,另一端通过特制的树脂收集器^[6]与热压罐真空接口相连。待抽真空织物压实后,检查其密封性。确认密封良好后,利用真空负压将配好的树脂灌注到模腔中,灌注完毕后关闭入口阀门。将小推车推入热压罐中,贴上热电偶,关闭罐门,设定固化参数,进行加热固化。

共进行10组试验,各组试验的编号与试验条件如表1所示。其中,V0组采用VARI工艺,其余为组合工艺。试验完成后,对样板^[7]的厚度及纤维体积分数进行测量,并将结果进行比较,分析组合工艺(热压罐/VARI组合工艺,以下简称组合工艺)的有效性及其最佳工艺参数。

结果与讨论

1 组合工艺的有效性分析

组合工艺的有效性即指其是否满足初始的工艺设计目的,主要包括厚度的降低、纤维含量及力学性能的提高等。

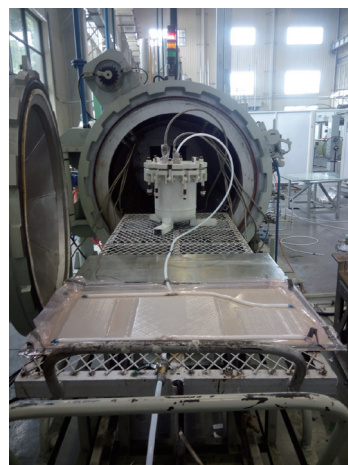


图2 热压罐/VARI组合工艺试验装置

Fig.2 Experimental facility of autoclave/VARI integrated molding process

表1 排出树脂阶段的保压压力和保压时间

试验编号	保压压力/kPa	保压时间/min
V0	0	0
Z1	300	0
Z2	300	5
Z3	300	10
Z4	300	20
Z5	300	30
Z6	200	20
Z7	400	20
Z8	500	20
Z9	150	20

VARI工艺制件与不同参数下组合工艺制件的 $\pm 45^\circ$ 、 0° 以及 90° 这3种铺层^[8]的厚度情况和纤维体积

分数分别如图 3 和 4 所示。根据图 3 和图 4 可知,无论铺层或者工艺条件如何,和 VARI 工艺制件相比,组合工艺对应铺层制件的厚度均有所降低,纤维体积分数亦均获得不同程度的提高。

由此可以说明,热压罐/VARI 组合工艺可以达到预期的目的。组合工艺制品要比 VARI 工艺制品具有更轻的质量、更高的纤维体积分数以及更好的性能。

2 工艺参数对组合工艺制件厚度和纤维体积分数的影响

影响热压罐/VARI 组合工艺制件厚度和纤维体积分数的因素主要有两个,排出树脂阶段的保压压力和保压时间(以下分别简称保压压力、保压时间)。为此,主要分析保压压力和保压时间对制件厚度和纤维体积分数的影响。

(1) 保压时间对制件厚度和纤维体积分数的影响。

当保压压力恒定 300kPa 时,厚度和纤维体积分数随保压时间的变化情况分别如图 5 和图 6 所示。

由图 5 和图 6 可以看出,在保压

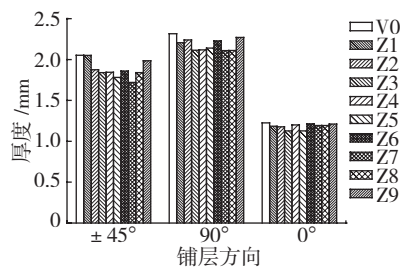


图3 制件的厚度对比

Fig.3 Thickness contrast of all the samples

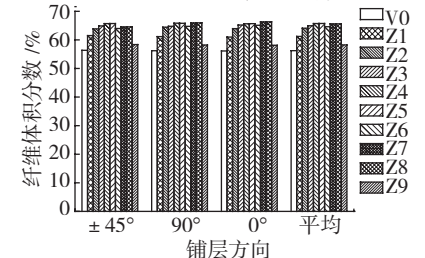


图4 制件的纤维体积分数

Fig.4 Fiber volume fraction of all the samples

的增加,相应制件的厚度逐渐减小,同时纤维体积分数逐渐增加,原因可能是随着保压时间的延长碳纤维层间变得更加密实^[9-10],层间多余树脂被排出。当保压时间达到 10min 后,厚度的减小和纤维体积分数的增加逐渐趋于平缓,即碳纤维层间的接触已经十分紧密。当保压时间达到 20min 左右时,厚度的减小和纤维体积分数的增加达到了极限,此后随着保压时间增加,厚度几乎不再减小,纤维体积分数亦不再改变,说明碳纤维层间压缩和树脂的排出已经达到了极限^[11],延长保压时间已无效果。

(2) 保压压力对制件厚度和纤维体积分数的影响。

当保压时间恒定 20min 时,厚度和纤维体积分数随保压压力的变化情况分别如图 7 和图 8 所示。

综合图 7 和图 8,在恒定保压时间 20min 时,厚度随保压压力的增加逐渐减小,纤维体积分数有上升的趋势,原因可能是保压压力的增加有利

于碳纤维层间的紧密接触^[6],层间多余树脂被排出。压力达到 300kPa 左右之后,厚度不再减小,纤维体积分数不再提高,说明 300kPa 左右之后保压压力的提高已经对碳纤维层间压缩不再有明显的改善,树脂亦不再排出。

结合上述讨论可以得出:(在本文所用材料及仪器设备的条件下)保压压力 300kPa、保压时间 20min 的工艺条件可以说是本文组合工艺的最佳工艺条件。

结论

(1) 本文设计的组合方案的创新之处在于:一是既不需要改造热压罐设备,也不需要单独设计树脂注射操作系统,只需添加一个特制树脂收集器,和已报道的组合方案相比其额外成本、操作风险都较低;二是通过调节热压罐内压力或其保压时间就能实现对纤维含量的调控。

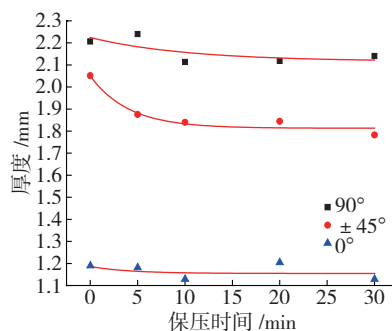


图5 保压时间对厚度的影响

Fig.5 Effect of pressure time on the thickness

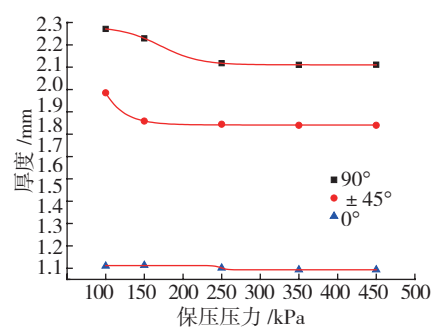


图7 保压压力对厚度的影响

Fig.7 Effect of pressure value on the thickness

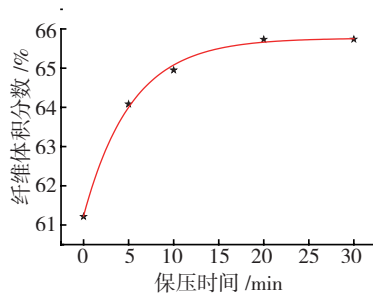


图6 保压时间对纤维体积分数的影响

Fig.6 Effect of pressure time on the fiber volume fraction

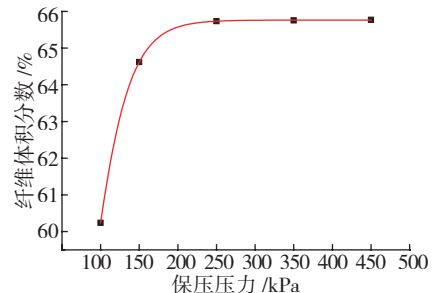


图8 保压压力对纤维体积分数的影响

Fig.8 Effect of pressure value on the fiber volume fraction

(2) 本文设计的组合工艺可以达到预期的目的,其制品要比 VARI 工艺制品具有更小的厚度、更高的纤维体积分数以及更好的性能,其纤维体积分数一般可以达到 60% 以上。

(3) 在保压压力恒定 300kPa 的情况下,随着保压时间的增加,相应制件的厚度逐渐减小,同时纤维体积分数的增加趋于平缓。

(4) 在恒定保压时间 20min 时,厚度随保压压力的增加逐渐减小,纤维体积分数有上升的趋势;保压压力达到 300kPa 左右之后,厚度不再减小,纤维体积分数不再提高。

参考文献

- [1] 潘利剑,刘卫平,陈萍,等.真空辅助成型工艺中预成型体的厚度变化与过流控制[J].复合材料学报,2012(5):244-248.
- PAN Lijian, LIU Weiping, CHEN Ping, et al. Change in preform thickness throughout the vacuum assisted resin infusion process and the post-filling control[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012(5): 244-248.
- [2] GOODELL B S, LOPEZ-ANIDO R A, HERZOG B. Composites pressure resin infusion system (ComPRIS): US, US7300894[P]. 2003-

12-27.

[3] HERRMANN A S, PABSCH A, KLEINEBERG M. SLI-RTM fairings for fairchild dornier do 328 jet[C]. 22nd SAMPE Europe International Conference, Paris, 2001.

[4] 居建国,李文晓,薛元德.热压罐/VARTM 组合成型新工艺[J].纤维复合材料,2006(3):36-39.

JU Jianguo, LI Wenxiao, XUE Yuande. Discussion on autoclave/VARTM integrated molding process[J]. Fiber Composites, 2006(3): 36-39.

[5] 居建国,李文晓,薛元德,等.热压罐/VARTM 组合成型新工艺设计[J].航空制造技术,2007(12):72-74.

JU Jianguo, LI Wenxiao, XUE Yuande, et al. The design of autoclave/vartm integrated molding process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2007(12): 72-74.

[6] 晏冬秀,刘卫平,黄钢华,等.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, et al. Design study for composites autoclave forming mould[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(7): 49-52.

[7] 曹增强,于晓江,蒋红宇,等.复合材料的切割[J].航空制造技术,2011(15):32-35.

CAO Zengqiang, YU Xiaojiang, JIANG Hongyu, et al. Cutting of composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(15): 32-35.

[8] 龚佑宏,韩舒,杨霓虹,等.纤维方

向对碳纤维复合材料加工性能的影响[J].航空制造技术,2013(23-24):137-140.

GONG Youhong, HAN Shu, YANG Nihong, et al. Effect of fiber orientation on machining performance of carbon fiber-reinforced plastics[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(23-24):137-140.

[9] 潘利剑,刘卫平,陈萍,等.碳纤维经编多轴向织物的压缩特性[C]//第十四届中国科协年会第11分会场:低成本、高性能复合材料发展论坛论文集.石家庄,2012.

PAN Lijian, LIU Weiping, CHEN Ping, et al. Research on compression behavior of multi-axial warp-knitted fabrics[C]// Proceedings of the Fourteenth Session of the Annual Meeting of the Association of China Eleventh Venue: Low Cost, the High Performance Composite Materials Development Forum. Shijiazhuang, 2012.

[10] 庄恒飞,潘利剑,刘卫平,等.VARI 成型厚度稳定与抽真空时间的研究[J].玻璃钢/复合材料,2015(2):5-10.

ZHUANG Hengfei, PAN Lijian, LIU Weiping, et al. A study of the steady thickness by the vacuum assisted resin infusion process and the vacuum keeping time[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2015(2): 5-10.

[11] 刘卫平,陈萍,陈吉平,等.一种控制复合材料真空辅助成型厚度的制造方法:中国,CN104908337A[P].2015-09-16.

LIU Weiping, CHEN Ping, CHEN Jiping, et al. Manufacturing method for controlling thickness of vacuum assisted molding composite material: China,CN104908337A[P]. 2015-09-16.

Quality Estimation of Product Manufactured by the Autoclave/VARI Process

WANG Zhaozhao^{1,2}, PAN Lijian^{2,3}, ZHUANG Hengfei², DUAN Zhenjin^{1,2}, LIU Yuting², HU Xiufeng²

(1. College of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Center for Civil Aviation Composites, Donghua University, Shanghai 201620, China;

3. Shanghai Key Laboratory for Light-Weight Composite Materials, Donghua University, Shanghai 201620, China)

[ABSTRACT] Advantages and disadvantages based on comprehensive analysis of the autoclave and vacuum assisted resin infusion (VARI) have been discussed and synthesized. The new process combined autoclave with VARI has been developed. The quality of product produced by the new process has been evaluated and compared with VARI, including fiber volume fraction and thickness. The results show that the product manufactured by the new process present more excellent mechanical properties and less porosity or resin enrichment. In addition, fiber volume fraction of the product by new process can up to 60%. The longer holding time is, the higher the fiber volume fraction will be, until it reaches a certain value.

Keywords: Autoclave; VARI; Fiber volume fraction; Workpiece thickness

(责编 海山)