

预压实参数对复材构件变厚层压区孔隙率的影响

文诗琦,文友谊,何思敏,李 棵,杨永忠

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司,成都 610092)

[摘要] 孔隙是复材构件中不可避免但又对结构强度影响非常重大的缺陷。采用共固化及真空袋-热压罐成型方法制备了蜂窝夹层复材构件,研究了不同预压实工艺参数对蜂窝夹层复材构件变厚层压区域孔隙率的影响。通过改变预压实真空度、预压实时间及预压实辅助材料组合方式进行对比试验得出:提高预压实真空度、适当延长预压实时间及采用有孔隔离膜 A4000RP3+ 透气毡 Style PC3 的预压实辅助材料组合方式,可以起到降低复材构件变厚层压区域孔隙率作用。

关键词: 孔隙;蜂窝芯夹层;复合材料;预压实;真空;力学性能

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.14.045



文诗琦

硕士、工程师,研究方向为先进复合材料构件制造工艺,曾获航空工业集团科技成果二等奖及第十六届“海洋王”杯全国 QC 小组发表赛一等奖。

碳纤维增强树脂基复合材料与传统金属材料相比,具有轻质高强和优良的耐高温、耐蚀性能,广泛应用于航空航天、国防等高新技术领域^[1-4]。

孔隙率是碳纤维增强树脂基复合材料中最常见、最为重大的缺陷之一。目前已有诸多研究表明,复合材料中孔隙率的存在会影响其力学性能、冲击韧性和疲劳寿命^[5-10]。因此,很多项目对碳纤维增强树脂基复合材料零件的孔隙率都有量化的指标验收要求。如波音就要求复材飞机舵面孔隙率不能高于2%(部分凸缘和转角等成型应力集中区域会允许到4%);空客要求蜂窝芯夹层复材翼面构件如下垂板、扰流板层压板区域超声衰减 $\leq 12\text{dB}$,后缘大梯度层压变厚区域 $\leq 18\text{dB}$,这对零件制造工艺提出了新的要求。

针对孔隙率对复材力学性能的重要影响,国内外很多学者对影响复合材料孔隙率的因素做了大量分析,但多为机理性探索,缺乏工程化研究,且大多以碳纤维织物或单向带增强树脂基简单等厚层压板为研究对象,而实际复材零件大多不是简单的

等厚层压结构,如许多蜂窝夹层复材构件中蜂窝边缘与蒙皮过渡区常存在含填充层的变厚度层压区域,该区域铺叠数量多、尺寸大梯度突变,极易产生孔隙率超差缺陷。本文针对蜂窝芯夹层复材构件,重点研究铺叠过程中预压实工艺参数对大梯度变厚层压区域孔隙率影响,旨在摸索出优化的预压实参数,用于指导类似零件孔隙率控制。

试验及方法

1 蜂窝芯夹层复材试验件制造方案

采用共胶接工艺及真空袋-热压罐成型法制备蜂窝芯夹层复材试验件,用阴模进行铺叠,制造流程如图1所示。原材料主要为 M21E/34% 单向带预浸料(Hexcel)、FM300M 胶膜(CYTEC)和 N-636 聚酰胺蜂窝芯(EC),其中 M21E/34% 单向带预浸料纤维体积分数约 59%。热压罐为德国肖茨公司(SCHOLZ)制造,

型号为 SCH-4 × 12。

该零件为手工铺叠,大梯度变厚层压区域结构如图 2 所示。该区域共由 36 层 M21E/34% 单向带构成,其中上蒙皮 8 层,铺层角度为 [45° 135° 90° 0°]; 填充层 20 层,铺层角度均为 0°; 下蒙皮 8 层,铺层角度与上蒙皮一致。为研究预压实参数对零件变厚层压区域孔隙率影响,本文设计了 3 种方案:(1)调整预压实真空度,其余参数不变;(2)调整预压实时间,其余参数不变;(3)调整预压实辅助材料组合方式,其余不变。针对预压实真空度和时间的研究,因上蒙皮为简单层压结构,本研究仅针对填充层和下蒙皮,调整铺叠过程中预压实真空和预压实时间开展对比试验,上蒙皮预压实采用(90 ± 2)kPa 真空,时间为 10min,试验参数见表 1,每种参数制备 2 件试验件。针对预压实辅助材料组合方式的研究,具体试验参数见表 2。

2 孔隙率检测及表征

试验件大梯度变厚层压区域孔隙率采用超声相控阵检测系统

(OMNISCAN MX2)进行检测,以超声衰减值作为表征。将试验件进行剖切后对试样进行显微镜分析。首先采用环氧树脂镶嵌试样,依次采用 500#、1200# 和 4000# 的 SiC 防水砂纸对试样进行打磨,最后用 1μm 金刚石砂纸进行抛光处理后清洗干净。采用 ZEISS “STEMI 2000-C” 显微镜验证试样表面抛光处理质量,采用 REICHERTER-JUNG “MeF-3” 光学显微镜对抛光好的试样进行组织形貌观察。

结果与讨论

1 预压实真空度对变厚层压区域孔隙率影响

预压实真空度是纤维增强树脂基复材构件制造的重要工艺参数之一,郭明恩等^[1]在研究真空导入对玻璃纤维/乙烯基酯树脂复合材料孔隙含量影响时发现,复合材料平均孔隙含量随着真空度的提高而降低,当真空度达到 80~90kPa 范围内时孔隙含量变化不显著,真空度为 100kPa 时孔隙率含量略有增加但标

准偏差值继续减小。铺叠时对试验件变厚度层压区域采用不同真空度预压实,将固化后的零件进行超声检测,结果如表 3 所示。

分析表 3 的数据发现,当填充层

表1 试验件预压实设置参数

试验件编号	预压实真空 / kPa		预压实时间 / min	
	填充层	下蒙皮	填充层	下蒙皮
T1-1	33 ± 2	33 ± 2	10	10
T1-2	33 ± 2	33 ± 2	10	10
T2-1	33 ± 2	90 ± 2	10	10
T2-2	33 ± 2	90 ± 2	10	10
T3-1	90 ± 2	90 ± 2	10	10
T3-2	90 ± 2	90 ± 2	10	10
T4-1	33 ± 2	90 ± 2	20	10
T4-2	33 ± 2	90 ± 2	20	10
T5-1	33 ± 2	90 ± 2	20	20
T5-2	33 ± 2	90 ± 2	20	20

表2 预压实辅助材料组合方式试验参数

试验件编号	预压实辅助材料
M1-1	A4000+Airweave N10
M1-2	A4000+Airweave N10
M1-3	A4000+Airweave N10
M2-1	A4000RP3+ Style PC3
M2-2	A4000RP3+ Style PC3
M2-3	A4000RP3+ Style PC3

表3 不同预压实真空度下变厚层压区域超声衰减结果

试验件编号	预压实真空度 /kPa		超声衰减 / dB
	填充层	下蒙皮	
T1-1	33 ± 2	33 ± 2	18
T1-2	33 ± 2	33 ± 2	19
T2-1	33 ± 2	90 ± 2	17
T2-2	33 ± 2	90 ± 2	15.5
T3-1	90 ± 2	90 ± 2	13
T3-2	90 ± 2	90 ± 2	11

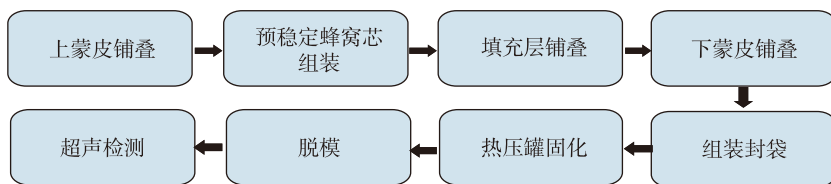


图1 蜂窝芯夹层复材构件制造流程图

Fig.1 Manufacture flow of sandwich composite part

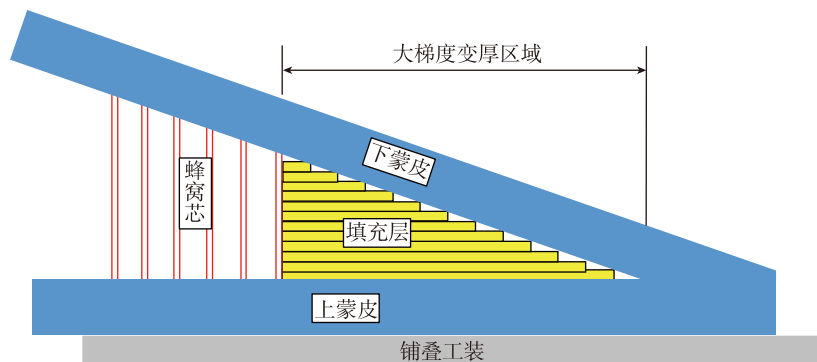


图2 蜂窝芯夹层复材构件变厚层压区域结构示意图

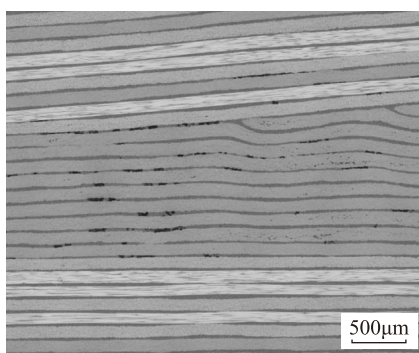
Fig.2 Sketch of sandwich composite part filler ply area

和下蒙皮均采用 (33 ± 2) kPa 真空度预压实时,变厚层压区域超声衰减较为严重;当填充层预压实真空度不变,而提高下蒙皮的预压实真空度至 (90 ± 2) kPa 时,填充层区域超声衰减值开始降低;当继续将填充层和下蒙皮预压实真空度均提高至 (90 ± 2) kPa 时,变厚层压区域超声衰减值降低明显。不难看出,该构件变厚层压区域孔隙对预压实真空度非常敏感。此外,对比表 3 的 6 组试验数据还能发现,提高填充层预压实真空度对降低该蜂窝芯夹层复材构件大梯度变厚层压区域孔隙效果比提高下蒙皮预压实真空度明显。

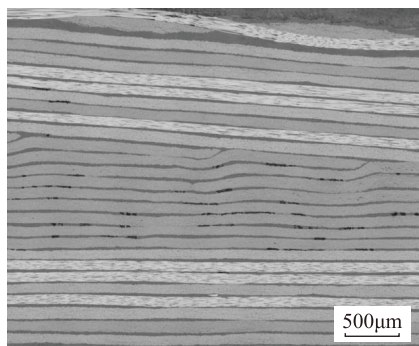
图 3 为不同真空预压实后试验件变厚层压区域截面的微观形貌,可以发现孔隙主要存在于单向带预浸料层与层之间,且集中出现在填充层区域,仅有少量的孔隙分布在下蒙皮中,随着下蒙皮预压实真空度的提高,下蒙皮中孔隙带尺寸有减小的趋势。孔隙在填充层之间弥散分布,当细小分散的孔隙聚集在一起就形成了串连的孔隙带,局部尺寸可达到 $> 400\mu\text{m}$,随着填充层预压实真空度的提高,孔隙由相对集中逐渐分散,尺寸也开始变小,但即使将填充层预压实真空提高至 (90 ± 2) kPa,填充层之间仍然存在少量的孔隙,这是由于预浸料具有一定的黏性,在铺叠过程中容易局部粘连在一起,真空对铺层存在一个压实的作用,在一定程度上封闭了排出空气的通道,填充层料片为细长条状,铺层数量众多,且存在一个较大的厚度梯度,铺叠难度加大,施加同等预压实真空,在铺层厚的填充层间压力传递易出现不均匀现象,再加上铺叠时擀压不充分,铺层之间的空气容易残留在其中,即使后续提高下蒙皮预压实的真空度,这些气体也难以排出,因此控制填充层区域孔隙率对控制整个变厚层压区域的孔隙率起到了关键性作用。

2 预压实时间对变厚层压区域孔隙率影响

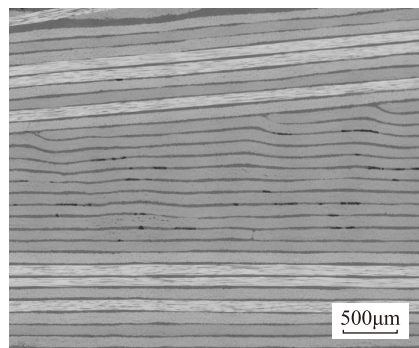
预压实时间是指零件预抽袋从抽紧开始至断开真空管路这段时间。本次试验固定上蒙皮预压实真空度为 (90 ± 2) kPa,每次预压实时间为 10min,填充层和下蒙皮分别采用 (33 ± 2) kPa 和 (90 ± 2) kPa 真空度预压实。以填充层和下蒙皮预压实时间为变量,研究不同预压实时间对变厚层压区域孔隙率影响,对比试验结果如表 4 所示。



(a) 填充层 (33 ± 2) kPa,下蒙皮 (33 ± 2) kPa



(b) 填充层 (33 ± 2) kPa,下蒙皮 (90 ± 2) kPa



(c) 填充层 (90 ± 2) kPa,下蒙皮 (90 ± 2) kPa

图3 不同真空预压实下变厚层压区域微观形貌
Fig.3 Microstructures of variable thickness area with different compaction vacuum

分析表 4 可知,当真空预压实真空不变,随着预压实时间的增加,试验件变厚层压区域超声衰减值仅有小幅度降低的趋势,改善效果不明显。在实际生产中,预压实时间过长将会延缓零件生产交付进度,因此在降低零件孔隙率上应首先选择提高预压实真空度的方式,当预压实真空度无法改变的情况下,才建议增加零件预压实的时间来确保铺层之间的空气尽可能多地被排出,建议实际生产中零件单次预压实时间不超过 20min。

图 4 显示了不同时间预压实后试验件变厚层压区域截面的微观形貌,其中图 4 (a)中填充层和下蒙皮均采用 10min 预压实,图 4 (b)中填充层和下蒙皮均采用 20min 预压实,可以发现孔隙不仅存在于单向带预浸料层与层之间,还广泛分布于预浸料内部。预浸料内部形成的孔隙存在于树脂基体及纤维束中,基体中的孔隙主要是由树脂基体和有机溶剂在固化反应中产生的低分子量挥发物引起,而纤维束内的孔隙主要是因为纤维束排列紧密及深层纤维没有被树脂基体完全浸润产生,相比层间孔隙,层内孔隙呈现小圆球形且分散性较大,而层间孔隙多以细长的椭球形呈现且尺寸差异较大。对比图 4 (a)和图 4 (b)可以得出,增加预压实时间对降低层

表4 不同预压实时间下变厚层压区域超声衰减结果

试验件编号	预压实时间 /min		超声衰减值 / dB
	填充层	下蒙皮	
T1-1	10	10	18
T1-2	10	10	19
T4-1	20	10	18.5
T4-2	20	10	19
T5-1	20	20	17
T5-2	20	20	17.5

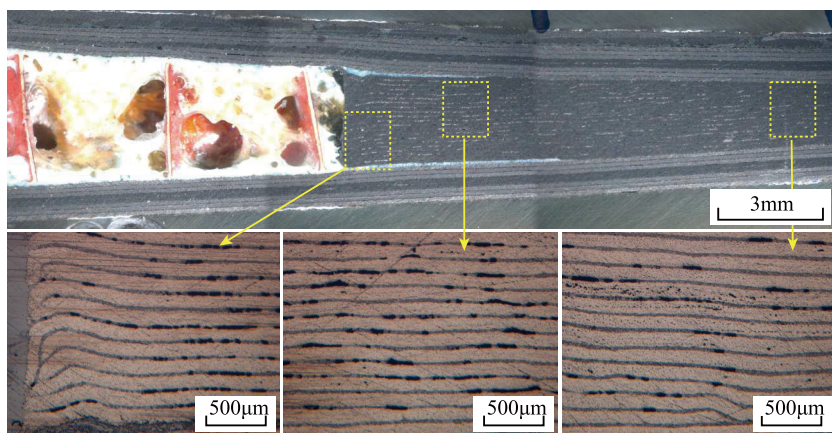
间孔隙有一定作用,表现在各区域孔隙数量的减少,但孔隙尺寸无明显改变。此外,还发现孔隙在填充层厚度方向分布存在差别,孔隙最多处于填充层中等厚度处,分布较为集中且均匀,其次是填充层与蜂窝芯胶接区域(该位置填充层最厚),孔隙最少处位于远离蜂窝芯的区域(该位置填充层最薄),这是因为填充层最厚和最薄处均是铺层边缘,在预压实过程中层间裹入的空气易于导出,而中部因距铺层边缘太远,空气导出通道增长,排出困难。

3 不同预压实辅助材料对变厚层压区域孔隙率影响

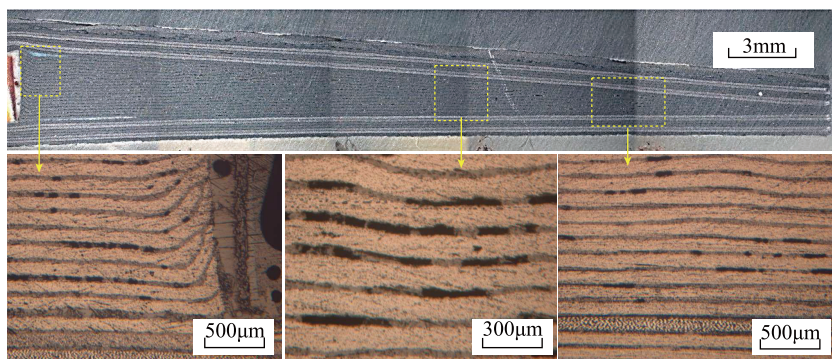
碳纤维增强树脂基复材构件在铺叠预压实过程中需要使用隔离膜、透气织物、腻子条和真空袋等辅助材料来形成一个密封的系统用于对袋内的复材构件施加真空。其中隔离膜可直接与零件接触,作用是防止透气毡和真空袋等不可接触材料污染零件;而透气织物主要由聚酯或尼龙制成,主要是帮助排除真空袋内多余的空气,起到导气和透气作用。在真空袋-热压罐成型法制备碳纤维

增强树脂基复材零件中预压实辅助材料的选择对导气效果尤为重要。本次试验采用碳纤维增强树脂基复合材料典型铺叠预压实封袋方式(见图5),固定上蒙皮预压实真空度为 (90 ± 2) kPa,预压实时间 10min,填充层和下蒙皮分别采用 (33 ± 2) kPa和 (90 ± 2) kPa 真空度预压实,预压实时间 20min,以预压实辅助材料组合方式为变量,研究其对变厚层压区域孔隙率影响,对比试验结果如表5所示。

从表5可以得出,采用 A4000 隔离膜+Airweave N10 透气毡进行预压实,导气效果不佳,而改用 A4000RP3 隔离膜+Style PC3 透气毡后,零件层压变厚区域孔隙率有所改善,超声衰减降低了约 1.5~4.5dB,这是由于 A4000 为无孔隔离膜(图6(a)),在预压实过程中完全将零件覆盖,空气仅可通过无孔隔离膜四周排出,而 A4000RP3 为有孔隔离膜(图6(b)),在预压实过程中空气不仅可以从四周导出,同时可以从任一弥散分布的微孔导出,导气均匀且效率提高。同时,透气毡 Style PC3 导气效果也优于 Airweave N10,这是由于 Airweave N10 是具有一定厚度(约 2mm)的聚酯透气毡,在刚开始预压实时较蓬松,导气性好,但随着预压实次数增多,Airweave N10 被压扁,厚度减小,表观密度增加,导气通道减少,导气效果变差,而透气毡 Style PC3 为网



(a) 填充层 10min + 下蒙皮 10min



(b) 填充层 20min + 下蒙皮 20min

图4 不同时间预压实下变厚层压区域微观形貌

Fig.4 Microstructures of variable thickness area with different compaction time

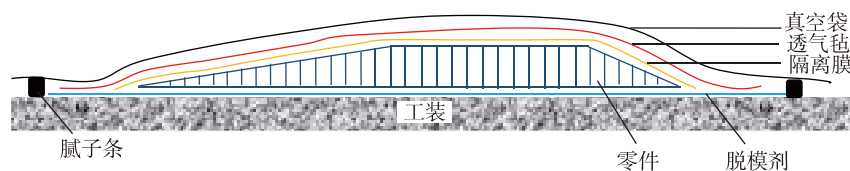
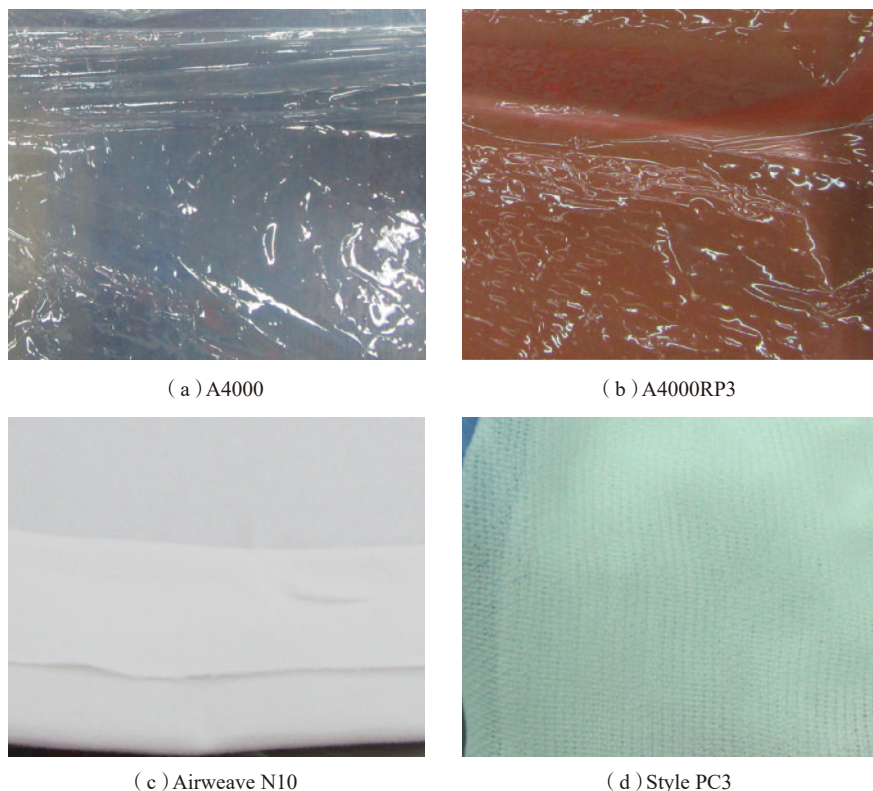


图5 预压实封袋示意图

Fig.5 Temporary vacuum bag scheme

表5 不同预压实辅助材料下变厚层压区域超声衰减结果

试验件编号	超声衰减值 /dB
M1-1	17.5
M1-2	19
M1-3	19
M2-1	15
M2-2	14.5
M2-3	16



(a) A4000

(b) A4000RP3

(c) Airweave N10

(d) Style PC3

图6 不同预压实辅助材料示意图

Fig.6 Sketch of different compaction ancillary materials

状织物,厚度约为 0.5mm,反复使用厚度不会变化,能维持原有的导气通道,且因厚度薄在预压实过程中能最大程度贴紧零件表面,将真空袋内空气导出,因此在反复预压实过程中整体导气性和透气性优越。Airweave N10 和 Style PC3 实物对比如图 6(c) 和图 6(d) 所示。

结论

通过研究预压实参数对复合材料构件变厚层压区域孔隙率的影响,得出以下结论:

(1) 在预压实时间相同的条件下,随着填充层和下蒙皮预压实真空度的增加,零件变厚层压区域超声衰减减少明显,故提高零件预压实真空度能有效减少零件填充层区域孔隙率。

(2) 在预压实真空度相同的条件下,随着填充层和下蒙皮预压实时间增加,零件变厚层压区域超声衰减有一定程度减少,但改善效果不如

提高预压实真空明显。

(3) 在预压实真空和时间相同的条件下,对比了不同预压实辅助材料组合方式对变厚层压区域孔隙率影响。得出采用有孔隔离膜 A4000RP3+ 透气毡 Style PC3 作为预压实封袋辅助材料能得到较好的导气效果,对降低零件变厚层压区域超声衰减具有积极作用。

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.
- [2] ATADERO R A, KARBHARI V M. Calibration of resistance factors for reliability based design of externally-bonded FRP composites[J]. Composites: Part B, 2008, 39(4): 665-679.
- [3] 顾轶卓, 李敏, 李艳霞, 等. 飞行器结构用复合材料制造技术与工艺理论进展[J].

航空学报, 2015, 36(8): 2773-2797.

GU Yizhuo, LI Min, LI Yanxia, et al. Progress on manufacturing technology and process theory of aircraft composite structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(8): 2773-2797.

[4] MAROUANI S, CURTIL L, HAMELIN P. Composites realized by hand lay-up process in a civil engineering environment: initial properties and durability[J]. Materials and Structures, 2008, 41(5): 831-851.

[5] 何柏灵, 葛东云, 莫与明, 等. T800 碳纤维增强复合材料双剪单钉连接的拉伸试验及强度估算[J]. 复合材料学报, 2016, 33(7): 1540-1552.

HE Boling, GE Dongyun, MO Yuming, et al. Tensile tests and strength estimation for double-lap single-bolt joints in T800 carbon fiber reinforced composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(7): 1540-1552.

[6] MA X Q, GU Y Z, LI M, et al. Investigation of carbon fiber composite stiffened skin with vacuum assisted resin infusion/prepreg co-curing process[J]. Science China Technological Science, 2014, 57(10): 1956-1966.

[7] COSTA M L, ALMEIDA F M, REZENE M C. The influence of porosity on the interlaminar shear strength of carbon/epoxy and carbon/bismaleimide fabric laminates[J]. Composites Science and Technology, 2001, 61(14): 2101-2108.

[8] CHANVERS A R, EARL J S, SQUIRES C A, et al. The effect of voids on the flexural fatigue performance of unidirectional carbon fiber composites developed for wind turbine applications[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(10): 1389-1398.

[9] NIGHTINGALE C, DAY R J. Flexural and interlaminar shear strength properties of carbon fiber/epoxy composites cured thermally and with microwave radiation[J]. Composites: Part A, 2002, 33(7): 1021-1030.

[10] 朱洪艳, 李地红, 张东兴, 等. 孔隙率对碳纤维/环氧树脂复合材料层合板湿热性能的影响[J]. 复合材料学报, 2010, 27(2): 24-29.

ZHU Hongyan, LI Dihong, ZHANG (下转第 66 页)

含初始脱粘缺陷复合材料加筋壁板渐进压溃过程的数值模拟[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(11): 12-18.

ZOU Huamin, CUI Xiangbin, REN Mingfa, et al. Numerical simulation of the process of progressive crushing of composite reinforced wall plates with initial degumming defects[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2017(11): 12-18.

[21] WANG X M, XIE F Y, LI M, et al. Influence of core fillers on resin flow and fiber compaction of cocured skin-to-stiffener structures[J]. *Polymer Composites*, 2010, 31(8): 1360-1368.

[22] WANG X M, XIE F Y, LI M, et al. Experimental investigation of the compaction and tensile strength of co-cured skin-to-stiffener structures[J]. *Applied Composite Materials*,

2011, 18(5): 371-383.

[23] HUANG C K. Study on co-cured composite panels with blade-shaped stiffeners[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2003, 34(5): 403-410.

通讯作者: 古武, 工程师, 研究方向为树脂基纤维增强复合材料成型工艺, E-mail: guwugoogle@163.com。

Co-Bonding Technology of Composite Stiffened Skin Based on Self-Adaptive Mould

LIU Wen¹, GU Wu¹, LIU Zhijie¹, HE Kai¹, LIU Xuan², SONG Yuxiang², CUI Yihua²

(1. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China;

2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] In order to improve the fitting accuracy of the stiffened skin profile, an adaptive fitting method based on the self-adaptive mould was proposed. The rubber was treated as the fitting surface. It was vulcanized and its surface was formed with that of the cured composite skin. Then, the rubber was attached to the steel mould to form an adaptive mould. The results showed that the cooperated clearance and interference were eliminated by the adaptive fitting of the unvulcanized rubber. There were no negative effects on the mechanical properties of composites, and the mechanical properties of the rubber could satisfy the requirement of adaptive fitting. What's more, the effect of the method on the properties of composites was evaluated.

Keywords: Composite; Stiffened skin; Co-bonding technology; Self-adaptive; Mould

(责编 逸飞)

(上接第49页)

Dongxing, et al. Effect of porosity on the hydrothermal behavior of carbon fiber reinforced epoxy composite laminates[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2010, 27(2): 24-29.

[11] 郭明恩, 孙祖莉, 边文凤, 等. 真

空导入工艺参数对复合材料孔隙含量的影响[J]. *材料工程*, 2012(10): 54-57, 62.

GUO Mingen, SUN Zuli, BIAN Wenfeng, et al. Influence of processing parameters on void content in VARI manufacturing techniques[J].

Journal of Materials Engineering, 2012(10): 54-57, 62.

通讯作者: 文诗琦, E-mail: whiskyshane163@com。

Influence of Compaction Parameters on Porosity of Composite Part Laminated Area With Variable Thickness

WEN Shiqi, WEN Youyi, HE Simin, LI Ke, YANG Yongzhong

(AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

[ABSTRACT] Porosity is one of the most unavoidable defects in composite part which has significant impact on structural strength. The sandwich structural composite parts were manufactured by vacuum bag-autoclave co-curing method. Porosity of sandwich composite part laminated area with variable thickness was studied by adjusting compaction parameters including compaction vacuum, compaction time and ancillary material types. Results show that improving compaction vacuum, extending compaction time appropriately and using perforated release film A4000RP3 and breather Style PC3 can reduce the porosity of composite part variable thickness area.

Keywords: Porosity; Honeycomb sandwich; Composite; Compaction; Vacuum; Mechanical property

(责编 逸飞)