

CCF300/5228A 复合材料热隔膜成型工艺研究

晏冬秀¹ 安学锋^{2*} 闫 丽²

(1.上海飞机制造有限公司,上海 200436;2.中航复合材料有限责任公司,北京 101300)

摘 要 对 CCF300/5228A 复合材料进行了热隔膜成型工艺的研究,通过对 CCF300/5228A 预浸料的改性,确定了热隔膜成型用 CCF300/5228A 预浸料的基本参数。结合 CCF300/5228A 预浸料的基础理化实验和变形行为的建模分析,对 CCF300/5228A 复合材料的热隔膜成型工艺参数进行了选择和优化,并根据最优的热隔膜成型工艺参数制备了复合材料 C 型结构试验件。

关键词 CCF300/5228A 预浸料,复合材料,热隔膜成型工艺,建模分析

Hot diaphragm preforming process for CCF300/5228A composite

Yan Dongxiu¹ An Xuefeng² Yan Li²

(1.Shanghai Aircraft Manufacturing Co.,Ltd.,Shanghai 200436;
2.AVIC Composite Corporation Ltd.,Beijing 101300)

Abstract The hot diaphragm preforming process for CCF300/5228A composites was studied. The basic parameters of CCF300/5228A prepreg used for the hot diaphragm preforming process were obtained. Combined the physical and chemical experiment of CCF300/5228A prepreg with modeling analysis of deformation behavior, the parameters of hot diaphragm preforming process of CCF300/5228A composites were selected and optimized. Composites with C-shaped were fabricated according to the optimum parameters of hot diaphragm preforming process.

Key words CCF300/5228A prepreg, composite, hot diaphragm preforming process, modeling analysis

树脂基复合材料因具有比刚度高、比模量大、结构整体性好、可设计性强、耐疲劳性好等优点而广泛应用于航空航天领域。目前,针对飞机复合材料大厚度翼梁和复合材料加筋壁板的长桁,采用传统的手工铺贴方式存在生产效率低和稳定性较差等问题,国外在翼梁和长桁预制体制备方面已经采用自动化技术,通过减少人为因素的影响,提高制造效率和产品质量。常用的自动化制造过程包括首先通过自动铺带制成平板预制体,再通过热隔膜预成型工艺将其制成接近最终形状的预制体,最后通过热压罐固化成型。

热隔膜成型工艺是在一定温度下完成,预浸料的平板叠层预制体以曲率变化方式发生形变时,发生预浸料层间的滑移形变。为避免在层间滑移过程中纤维发生褶皱和断裂,平板叠层形变与层间滑移必须匹配。国外在热隔膜预成型工艺技术领域已开展了较为充分的研究,热隔膜成型工艺已成功应用于在波音 777 长桁、V22 长桁和 A400M 机翼前梁

等大型构件中,并发展成为一种重要的低成本制造技术^[1-5]。而国内对热固性复合材料热隔膜成型工艺的研究报道较少^[6-10],且国内的热隔膜成型工艺技术尚处于实验阶段,缺乏相关的理论和技术基础研究,并缺乏适用于热隔膜成型工艺的国产预浸料体系。

本研究采用自行研制的热隔膜成型设备,对国产 CCF300/5228A 复合材料进行了热隔膜成型工艺研究,结合 CCF300/5228A 预浸料的基础理化实验和变形行为的建模分析,对 CCF300/5228A 复合材料的热隔膜成型工艺参数进行了选择和优化,并根据最优的成型工艺参数制备了复合材料 C 型结构实验件。该项研究为热隔膜成型工艺技术在我国的工程化应用奠定了良好的基础。

1 实验部分

1.1 原料

CCF300/5228A 碳纤维/环氧树脂单向预浸料,

作者简介:晏冬秀(1976-),女,工程硕士,高级工程师,主要研究方向为先进复合材料制造技术。

联系人:安学锋。

中航复合材料有限公司;热隔膜膜片(牌号分别为 SL700 和 SL800),美国 Airtech 公司;工艺辅助材料,美国 Airtech 公司。

1.2 热隔膜成型工艺

采用自行研制的热隔膜设备对 CCF300/5228A 复合材料热隔膜成型工艺进行研究,热隔膜成型设备的基本原理如图 1 所示。

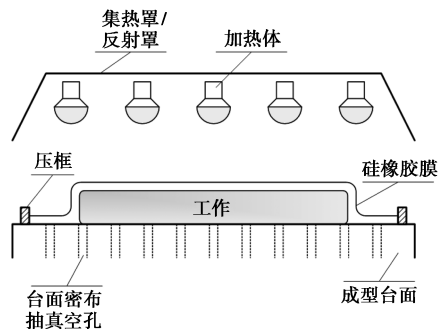


图 1 热隔膜成型设备的基本原理图

预浸料夹持在热隔膜膜片中,随热隔膜框架升降,贴近或离开成型模具。双层热隔膜之间抽真空,调节真空度,以此控制膜片对预浸料的夹紧程度。热隔膜框架与工作台面间以密封圈密封,工作台面密布真空孔,通过在膜片与台面间抽真空带动夹持的预浸料与模具贴合。电加热体分区可控加热,在工艺初始阶段加热软化树脂基体,便于成型;在完成贴模成型之后进一步升高温度,完成预制体的预成型。

2 结果与讨论

2.1 CCF300/5228A 热隔膜成型预浸料

CCF300/5228A 预浸料体系是高温固化碳纤维增强环氧树脂体系,其力学性能、物理化学性能及工艺性能已较成熟,但直接应用于热隔膜成型工艺有一定的问题,需要在进行其工艺性能评定的同时,对该树脂体系进行改性,才能满足热隔膜成型工艺的要求。5228A 树脂体系差示量热(DSC)曲线见图 2,

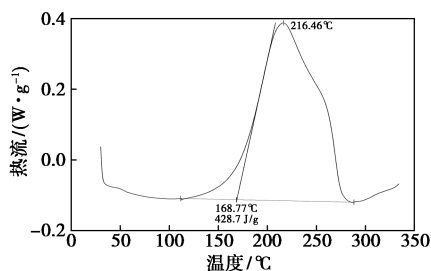


图 2 5228A 树脂体系 DSC 曲线图

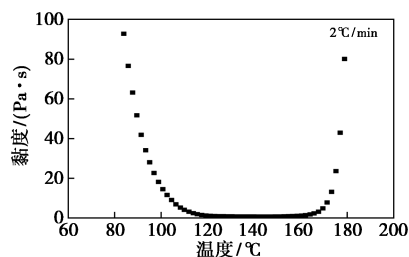


图 3 5228A 树脂黏度-温度曲线图

5228A 树脂体系的黏度-温度曲线见图 3。由图可见,5228A 树脂体系的初始反应温度为 116°C,固化反应的热焓为 436J/g,树脂的最低黏度点出现在 120°C 附近。

热隔膜成型专用预浸料在 CCF300/5228A 的基础上进行改进,改进的目标是增进层间在外力驱使下的变形及滑移能力。在热隔膜成型专用热固性预浸料研究过程中,课题组设计了两种方案,一种是在标准预浸料的表面复合改性剂,一种是提高标准预浸料的树脂含量。

通过在标准预浸料的表面复合 PAEK 改性剂可形成热隔膜成型用预浸料,这种预浸料的铺贴工艺性良好,但由于改性剂的存在会使层间区域的整体黏度增加而限制了层间滑移,不利于预浸料网格的变形,因此这种方案不是最优方案。

制备热隔膜成型专用预浸料的另一个方案是制备富树脂的非标准预浸料,其实质是用树脂本体充当了第一种方案中的改性剂。这种方案的优点是:(1)相对于标准预浸料,该方案所制备的预浸料整体富树脂,纤维间及层间的树脂多,利于预浸料层内的网格变形和层间滑移,从而提高了预浸料铺贴后的整体变形性能;(2)维持了原有 5228A 预浸料的铺贴性能。

最终确定的 CCF300/5228A 预浸料的基本参数如下:纤维体积分数为 55%,纤维面密度为 145g/m²,预浸料的树脂面密度为 83g/m²,树脂质量分数为 35%。

2.2 热隔膜成型用膜片

热隔膜成型用膜片要求具有良好的延展塑性和耐高温性,对两种膜片 SL700 和 SL800 进行了力学性能的测试,结果见表 1。

从表 1 中可以看出,膜片 SL700 的延伸率远大于 SL800,但 SL800 的拉伸强度高于 SL700,根据理论测试和实际实验结果,SL700 和 SL800 两种膜片均能满足热隔膜成型工艺的要求。

表 1 热隔膜用膜片的力学性能测试结果

项目	SL700		SL800	
	拉伸强度/ MPa	伸长率/ %	拉伸强度/ MPa	伸长率/ %
1	35.71	819.96	44.07	502.32
2	37.83	965.13	47.40	515.57
3	36.90	1043.95	35.80	423.62
4	36.99	681.20	46.65	573.75
5	32.36	700.68	45.95	484.41
平均值	35.96	842.18	43.98	499.94
比较值 ^①	100	100	100	100

注:①以初始状态为 100 计算。

2.3 CCF300/5228A 预浸料变形行为建模分析

CCF300/5228A 热隔膜成型专用预浸料变形行为的研究是在前文所述 DSC 和流变实验结果的基础上通过计算模拟完成的。计算模拟的软件为 ESI 公司的 PAM-Form。其中 DSC 和流变等测试结果作为 PAM-Form 的模拟输入量,结果见图 4。

由图可见,典型件在热隔膜成型过程中首先是底面贴合,然后通过侧面铺层的层间滑移来逐渐使预浸料叠合体与模具贴合赋型,最终确保弯角成型。因此,在整个热隔膜成型过程中,底面的应变小,而两侧的应变大,从而会在侧面产生层间滑移。

2.4 热隔膜成型工艺参数选择与初步优化

表 2 为采用 ABUQS 软件计算的具有不同铺层形式的典型件在特定载荷下 x、y 及 z 方向的变形图,可以看出[45/90/−45/0/45/0/−45/0]_{4s}铺层在 3 个方向的变形量均小于[45/−45/90/0]_{8s}铺层及[−45/90/45/0]_{8s}铺层,[45/90/−45/0/45/0/−45/0]_{4s}

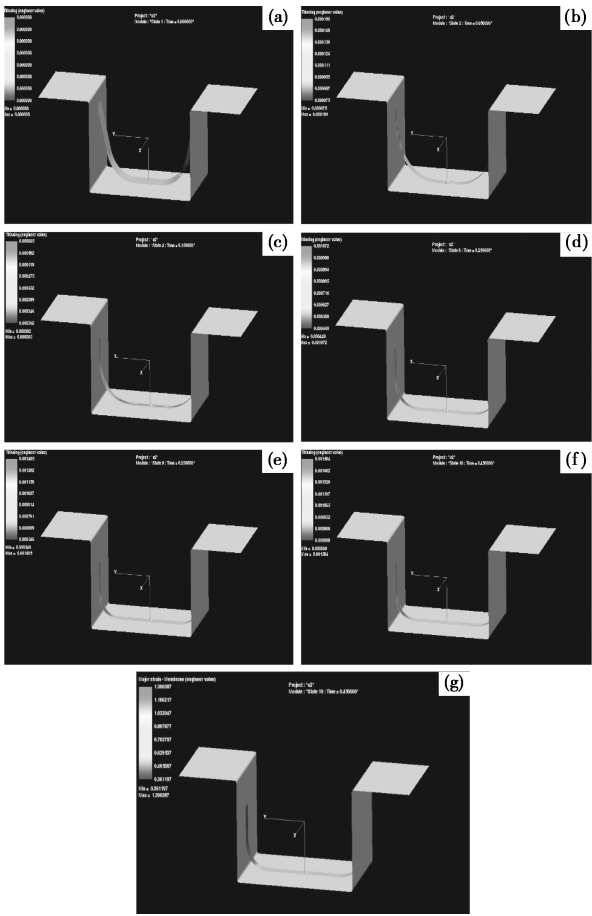
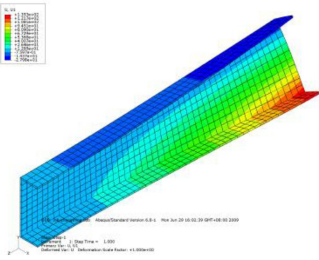
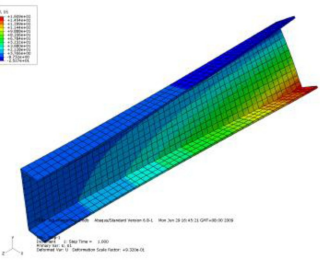
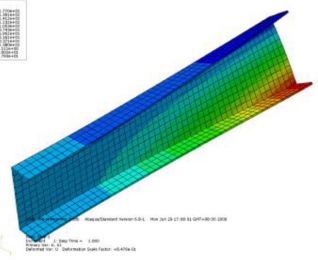


图 4 特征周期铺层[45/90/−45/0]变形过程及应变分布图

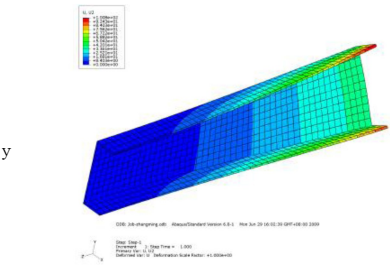
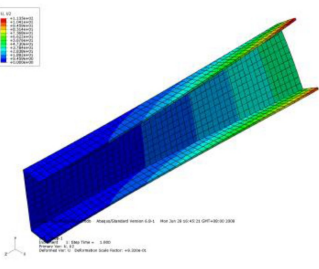
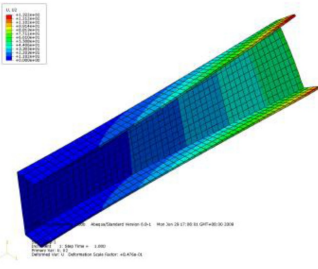
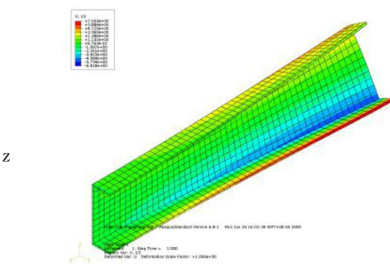
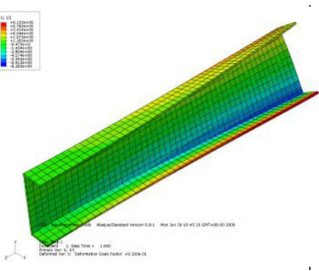
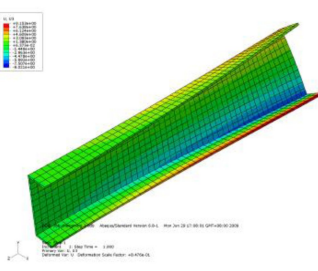
[(a) — (f) 为不同时间(0,0.5s,0.15s,0.25s,0.35s,0.45s)的变形图;(g)变形过程的应变图]

铺层可得到最小的变形和应力,采用该铺层制备的复合材料梁轴向正应力较大,能承担主要的载荷。通过以上分析,可以确定典型件的优化铺层方式为[45/90/−45/0/45/0/−45/0]_{4s}。

表 2 采用 ABQUS 计算的典型件不同铺层变形图

项目	铺层		
	[45/90/−45/0/45/0/−45/0] _{4s}	[45/−45/90/0] _{8s}	[−45/90/45/0] _{8s}
最大位移 x	 135mm	 161mm	 177mm

续表

项目	铺层		
	$[45/90/-45/0/45/0/-45/0]_{4s}$	$[45/-45/90/0]_{8s}$	$[-45/90/45/0]_{8s}$
最大位移	 100mm	 114mm	 132mm
	 7.1mm	 8.2mm	 9.2mm

在工艺参数选择方面,根据 DSC、流变等表征结果分析可以得出预浸料体系在 120°C 下为最佳变形温度点。选择 120°C 作为热隔膜预成型温度,采用热隔膜成型工艺制备了 CCF300/5228A 复合材料 C 型结构实验件,见图 5。由图可见,热隔膜成型典型工艺件的弯角处纤维平滑过渡,弯角内侧未出现褶皱,外侧未出现富树脂区[图 5(c)];在其侧壁,由于在弯角赋型时纤维层间均匀滑移,出现了基本等间距的纤维错层,这也验证了 PAM-Form 的计算结果。

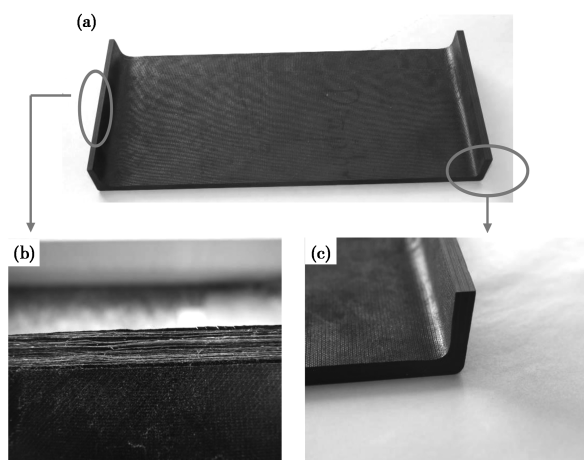


图 5 CCF300/5228A 复合材料 C 型结构实验件实物图

[(a)整体;(b)层间滑移;(c)典型弯角]

3 结论

(1)确定了热隔膜成型用 CCF300/5228A 预浸

料的基本参数:纤维体积分数为 55%,纤维面密度为 $145\text{g}/\text{m}^2$,预浸料的树脂面密度为 $83\text{g}/\text{m}^2$,树脂质量分数为 35%。

(2)以 DSC、DMA 和流变等的测试结果作为模拟输入的 PAM-Form 的计算,实验结果表明,典型件在热隔膜成型过程中首先是底面贴合,然后通过侧面铺层的层间滑移来逐渐使预浸料叠合体与模具贴合赋型,最终确保弯角成型。因此,在整个热隔膜成型过程中,底面的应变小,而两侧的应变大,从而会在侧面产生层间滑移。

(3)确定了 CCF300/5228A 复合材料的热隔膜预成型温度为 120°C ,采用热隔膜成型工艺制备了 CCF300/5228A 复合材料 C 型结构实验件,其弯角处纤维平滑过渡,弯角内侧未出现褶皱,外侧未出现富树脂区;在其侧壁,由于在弯角赋型时纤维层间均匀滑移,出现了基本等间距的纤维错层,这也验证了 PAM-Form 的计算结果。

参考文献

- [1] Delaloye S, Niedermeir M. Optimization of the diaphragm forming process for continuous fibre-reinforced advanced thermoplastic composites[J]. Compos Manuf, 1995, 6(3): 135-144.
- [2] Pantelakis S G, Baxevani E A. Optimization of the diaphragm forming process with regard to product quality and cost[J]. Compos Part A, 2002, 33(4): 459-470.

(下转第 249 页)