

复合材料帽形长桁热隔膜成型工艺研究

孙 凯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 介绍了复合材料帽形长桁预成型体的热隔膜成型工艺研究,完成了复合材料帽形长桁的固化制备,并分析了成型温度、变形速率和膜片对复合材料帽形长桁热隔膜预成型过程的影响。结果表明:采用热隔膜成型工艺成功制备了复合材料帽形长桁预成型体,热隔膜预成型温度为 $75\pm 5^{\circ}\text{C}$,完成固化的复合材料帽形长桁满足无损检测要求。对成型温度和隔膜间抽真空速率同时进行优化,才能确保预浸料具有最好的滑移能力。增加膜片厚度、提高膜片刚度都能显著提高热隔膜成型质量。

关键词 复合材料帽形长桁,热隔膜成型工艺,成型温度,变形速率,膜片

Hot diaphragm preforming process for composite hat-shaped stringer

Sun Kai¹ An Xuefeng² Yan Li²

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

Abstract Hot diaphragm preforming process for the preform of composite hat-shaped stringers was studied, then the stringers were cured. The effect of molding temperature, deformation mat and diaphragm on hot diaphragm preforming process was analyzed. The results showed that composites hat-shaped stringers were manufactured successfully through hot diaphragm preforming process. The preforming temperature was $75\pm 5^{\circ}\text{C}$, the stringers met the requirement of the nondestructive testing. The molding temperature and vacuum rate were optimized simultaneously to ensure that prepreg had best ability to slip. Increasing thickness and stiffness could significantly improve the molding quality of hot diaphragm preforming process.

Key words hot-shaped stringer, hot diaphragm preforming process, molding temperature, deformation mate, diaphragm

复合材料因具有比刚度高、比模量大、结构整体性好、可设计性强和耐疲劳性好等优点而广泛应用于航空航天领域。复合材料加筋壁板能够承受机身拉压和剪切载荷的作用,其结构的总体和局部刚度好,在减重方面亦拥有很大的优势。帽型加筋壁板作为最典型的加筋壁板结构,帽形加筋是一种减重效率较高的结构形式,在航空航天制造中广泛应用。

传统的复合材料帽形长桁主要采用预浸料手工铺放的方式得到长桁预成型体,然后采用热压罐固化。然而基于帽形长桁的结构形式,在手工铺放时帽形长桁的 R 区经常存在压不实的问题,造成 R 区的内部质量有缺陷。并且手工铺放的生产效率较低。为进一步提高生产效率,保证预成型体的质量,

热隔膜工艺能够很好地解决这个工艺^[1]。该工艺将手工铺放或自动铺带工艺铺放的预浸料平板预制体放置于预成型模具上,通过热隔膜预成型设备特制隔膜的辅助作用经过真空负压和加热作用将平板预制体制备成复杂形状的预成型体,其生产效率、成型质量和稳定性好^[2-3]。目前热隔膜成型工艺已经成功应用于 A400M 机翼复合材料前梁、B777 的长桁和 V22 的长桁^[4-6]。

国外已有成熟的热隔膜预成型工艺技术,而国内在复合材料结构生产上尚没有热隔膜成型技术的实际应用,且目前针对复合材料 C 型梁结构开展了相关的研究工作^[7-9],对复合材料帽型长桁的热隔膜成型工艺研究报道较少。本研究采用热隔膜成型工艺制备了复合材料帽形长桁预成型体,解决了复合

作者简介:孙凯(1984-),男,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为复合材料制造与修补。

联系人:安学锋。

材料帽形长桁的成型工艺中易出现缺陷的问题,突破了复合材料帽形长桁热隔膜成型预成型体的关键技术,为热隔膜成型技术在航空领域的应用奠定了良好的基础。

1 实验部分

1.1 原料

某高温碳纤维/环氧树脂单向预浸料,单层压厚 0.19mm,纤维面密度 190g/m²;热隔膜膜片 SL800、辅助材料,美国 Airtech 公司。

1.2 热隔膜成型原理

热隔膜成型的基本过程如图 1 所示:(1)首先将复合材料平板(热固性或热塑性)预浸料坯料放在两片具有超塑性的膜片之间,并且将四边固定,利用上下两层膜片的张力夹持住预浸料;(2)加热升温,使基体树脂处于黏流状态,然后通过抽真空结合加压的方式,使膜片/坯料组合贴到单面模具表面;(3)预浸料完全贴合到模具表面后,通过固化(热固性树脂)过程,固定制件形状并得到成型产品。

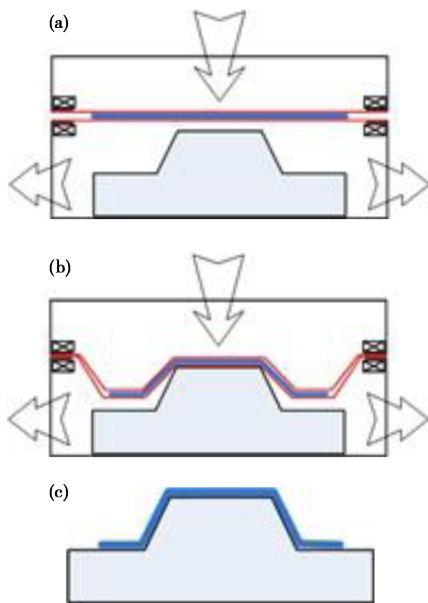


图1 热隔膜成型的基本过程图

[(a)预浸料平板;(b)加热、抽真空,变形;(c)曲面制件]

2 结果与讨论

2.1 复合材料帽形长桁平板预制体的制备

复合材料帽形长桁采用典型铺层[45/−45/0/0/45/90/−45/0]s的形式,按照铺层采用自动下料机进行裁剪预浸料,纤维角度偏差不超过±0.5°,然后进行铺贴,铺贴过程中每3~4层抽真空0.5h(真

空度≤−0.095MPa)。

2.2 复合材料帽形长桁预制体的制备

图2展示了复合材料帽形长桁热隔膜预成型工艺过程。首先,将长桁平板预制体的上下表面放上一层脱模布,然后将其放置在长桁预成型模具上,覆盖一层真空袋膜,在模具四周的压框对应的槽内放上腻子条,用压框固定真空袋4边,安装好模具上的抽真空阀门。

将长桁预成型模具放入烘箱内,接好真空,将模具升温至75±5℃,恒温30min,将模具抽真空至−0.095MPa,使真空袋膜带动预浸料贴合模具。继续恒温30min,在此期间维持模具内抽真空不变,停止加热,通风冷却至室温,在此过程中维持模具真空不变。去掉压框和真空袋膜,取出帽形长桁预成型体。

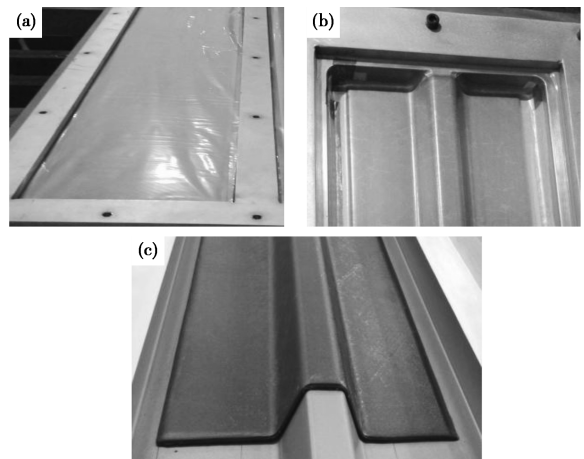


图2 复合材料帽形长桁热隔膜预成型工艺过程图

[(a)预浸料平板封装;(b)长桁预成型;(d)长桁预成型体]

2.3 复合材料帽形长桁预成型体的固化

将长桁预成型体放入长桁成型模具中,进行真空袋封装,封装辅助材料放置顺序见图3,辅助材料和真空袋不可以架桥。

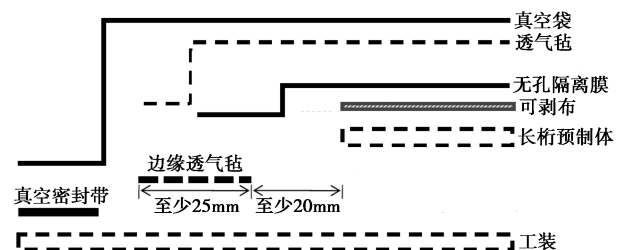


图3 长桁成型的真空袋封装图

按照图4的固化工艺进行热压罐固化,最终得到复合材料帽形长桁的制件。

经过无损检测,复合材料帽形长桁满足无损检测 HB7224—95 一级要求。

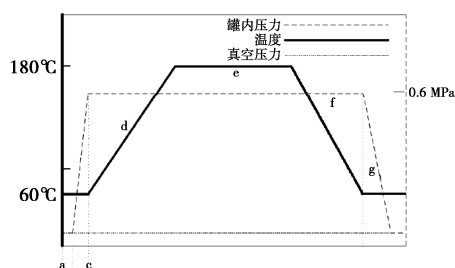


图 4 预浸料固化工艺图

2.4 复合材料帽形长桁热隔膜预成型过程的影响因素分析

2.4.1 成型温度

较高的成型温度会显著改善热隔膜成型的工艺性,提高层压板抗屈曲褶皱能力,改善复合材料质量。无论是理论分析还是实际成型实验结果,这都是非常明显的。但是成型温度也不是越高越好,至少下面两项因素需要认真考虑:

(1)预浸料的热历史。热隔膜预成型只是复合材料成型过程的一个阶段,之后还要进入热压罐进行最后的固化。为了保证成型后的复合材料具有良好的性能,应控制预浸料在较高热变形温度下的停留时间,通过实验确定最佳的成型温度-时间窗口。

(2)纤维网络的运动能力。在较高的温度下,树脂基体黏度降低,有利于铺层滑移的发生。但是另一方面,前期的工艺实验表明,在较高的真空度下,树脂基体黏度过低、流动性太好,也会造成膜片对预浸料约束过强,反而阻碍了层间滑移的进行。为此需要对变形温度和隔膜间抽真空速率同时进行优化,确保预浸料具有最好的滑移能力。

2.4.2 变形速率

在较低的温度和较高的剪切速率下,应变速率对层间剪切载荷具有显著的影响;而在较高的温度和/或较低的剪切速率下,这一影响显著降低,纤维网络的运动成为决定层压板变形行为的主要因素。此外,在铺层数较多时,降低剪切速率也会显著降低最大变形载荷。

在热隔膜成型较厚的预浸料平板时,提高成型温度、适当降低变形速率(抽真空速率)是比较有利的。需要在成型温度和成型时间之间做出平衡,兼顾复合材料制件的性能和质量。

2.4.3 膜片

考虑在特定变形条件下产生褶皱的层压板。假定层压板在垂直于褶皱的临界方向上的长度为 L ,

层压板(平行于褶皱)的宽度为 w 。这两个尺寸都与制件的大小成比例。铺层数为 N_p ,单个铺层的厚度为 H 。

于是,层间、层内黏性剪切力的比值见式(1)。

$$\frac{\Gamma_{v3}}{\Gamma_{12}} = \frac{N_p L_w m I \delta_{v3}^n}{N_p H_w m I \delta_{12}^n} = \frac{L I \delta_{v3}^n}{H I \delta_{12}^n} = \frac{L}{H} \left(\frac{\Gamma_{v3}}{\Gamma_{12}} \right)^n \quad (1)$$

已知 $H = 10^{-2} \text{ cm}$, $\Gamma_{v3}/\Gamma_{12} = 10^{2 \sim 3}$, $n = 0 \sim 0.45$ 。

对于长度 L 为 10cm 量级的制件,将长度代入式(1)得到式(2)。

$$\frac{\Gamma_{v3}}{\Gamma_{12}} = \frac{L}{H} \left(\frac{\Gamma_{v3}}{\Gamma_{12}} \right)^n = \frac{10}{10^{-2}} (10^{2 \sim 3})^{0 \sim 0.45} = 10^3 \sim 10^4 \quad (2)$$

由式(2)可见,这意味着层间黏性剪切力比层内黏性剪切力高 3~4 个数量级。因此,根据这一分析,层间黏性剪切应力是层压板内压力的主要来源。

两种屈曲阻力的相对大小近似可表达为式(3)。

$$\frac{2F_D}{F_{\text{elastic}}} \approx \frac{2 \cdot 12 D w \sigma_{11}^* L_b^2}{4 \pi^2 E(t) w N_p^a H^3} = \frac{6 D \sigma_{11}^* L_b^2}{\pi^2 E(t) w N_p^a H^3} \quad (3)$$

由于 $D = 10^{-1} \text{ cm}$, $\sigma_{11}^* = 10^6 \text{ Pa}$, $L_b = 10^0 \text{ cm}$, $E(t) = 10^7 \text{ Pa (室温)}$, $N_p = 10^0 \sim 10^1$, $a \approx 1.6$, $H = 10^{-2} \text{ cm}$, 得到式(4)。

$$\frac{2F_D}{F_{\text{elastic}}} = 10^2 \sim 10^4 \quad (4)$$

因此,膜片的张力是抑制层压板褶皱的主要因素。

隔膜膜片的刚度对抑制屈曲褶皱、保证成型质量具有决定性作用。增加膜片厚度、提高膜片刚度都能显著提高热隔膜成型质量。

3 结论

(1)采用热隔膜成型工艺成功制备了复合材料帽形长桁预成型体,所用的预浸料热隔膜预成型温度为 $75 \pm 5^\circ \text{C}$,完成了复合材料帽形长桁的固化制备,内部质量满足无损检测要求。

(2)分析了复合材料帽形长桁热隔膜预成型过程的影响因素:成型温度、变形速率和膜片。对变形温度和隔膜间抽真空速率同时进行优化,才能确保预浸料具有最好的滑移能力。增加膜片厚度、提高膜片刚度都能显著提高热隔膜成型质量。

参考文献

- [1] Ott Thomas. Composite hot drape forming[R]. USA: N94-30448, NASA Report, 1994.

(下转第 172 页)