

柔性混编预浸料制造热塑性复合材料加筋结构

安学锋, 张 明, 唐邦铭, 益小苏

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: PEEK 树脂基复合材料具有突出的韧性和高损伤容限, 但因成型工艺条件较为苛刻, 且铺覆性能差, 影响了曲面成型能力。利用柔性混编预浸料技术则可解决这一难题, 高质量、高效率地实现复杂曲面结构件的制备。分别带有“L”型加强筋和帽型材的加筋口盖的制造, 对此进行了充分的验证。

关键词: 热塑性复合材料; 柔性预浸料; 曲面成型; 共固结

中图分类号: TB332

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2006)03-0217-05

纤维增强树脂基复合材料的基体可分为热固性和热塑性两大类。与热固性树脂基复合材料相比, 热塑性树脂基复合材料的突出优点是具有高韧性和高损伤容限, 耐反复冲击性能好, 有利于克服传统热固性树脂基复合材料层间韧性不足的缺陷^[1-2]。但是目前国际上主流的热熔浸渍预浸料(以 APC-2 为代表^[3])存在硬度过高导致铺放能力差, 不便于成型复杂曲面和精细结构的问题。而且国产的 PEEK 树脂因为热加工稳定性差、设备温度控制精度差等原因, 至今不能实现热熔预浸。这些因素都影响了 PEEK 树脂在航空结构中的更广泛应用。

热塑性树脂可以纺丝, 而且在受热熔融后可以重新流动浸润纤维。通过混编法制备柔性预浸料, 利用柔性预浸料变形能力强、铺覆性好的特点可以解决成型曲面的问题^[4-5]。再通过热压连接技术, 可完成加筋结构的制造。

1 柔性混编预浸料

柔性预浸料的制备, 首先是将 PEEK 树脂纺成丝, 然后与碳纤维互为经线和纬线, 混编成平纹预浸料(图 1)。得到的预浸料中, PEEK 纤维和碳纤维之间可以发生一定程度上的滑动和旋转, 具有一定的变形能力。在制备复杂曲面结构时, 通过纤维间的相对滑移、节点处的旋转、网格的变形实现紧密贴模。在随后的高温热压过程中, PEEK 纤维熔融流动, 浸润碳纤维并形成连续的树脂基体。

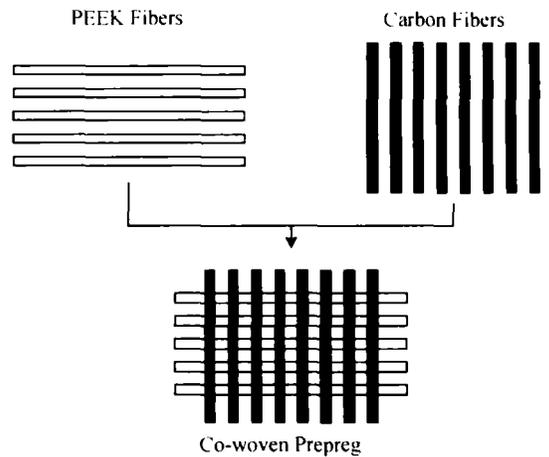


图 1 混编预浸料

Fig 1 Co-woven prepreg

以吉林大学提供的 PEEK 树脂为原料, 碳纤维选用 AS4_G, 获得的干态预浸料规格如表 1 所示。

表 1 T300/PEEK 混编预浸料规格

Table 1 T300/PEEK co-woven prepreg

	Unit	Value
Density	g/cm ³	1.5-1.7
Length		continuous
Width	mm	150-920
Thickness	mm	0.125-0.160
PEEK fiber bundles	bundle/10mm	6-10
Carbon fiber bundles	bundle/10mm	5.5-7.5
Area density	g/m ²	153-239.2
Fabric type		plain woven

收稿日期: 2006-01-20 修订日期: 2006-04-12

作者简介: 安学锋(1973-), 男, 博士, 现于北京航空材料研究院从事博士后研究, (E-mail) anxuefeng@gmail.com

热熔浸渍的 APC-2 预浸料硬度过高导致铺放能力差, 不便于成型复杂曲面和精细结构。我们通过两种技术途径克服这个困难: 对于相对简单的曲

面,利用热塑性树脂受热后可以再次熔融的特点,进行二次成型;而较复杂的曲面,则利用柔性预浸料变形能力强、铺覆性好的特点直接成型曲面。这两种方法的对比见图 2。

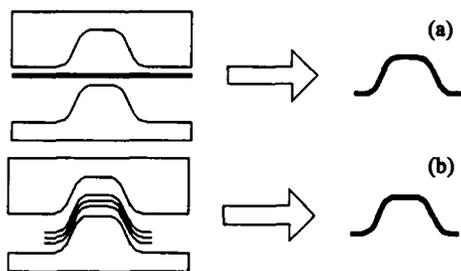


图 2 二次成型与柔性预浸料成型的对比

(a) 二次成型; (b) 柔性预浸料成型

Fig 2 Comparison of secondary forming and flexible prepreg forming

(a) secondary forming (b) flexible prepreg forming

热塑性复合材料的连接性能比较好,可以将复杂的形状分解成形状较简单的基本组成部分,然后再通过热压连接或共固结组成完整的部件。两者的区别是,热压连接需要先制备各个组成部件,而共固结可以将部件的成型与各部件的连接同时进行(图 3)。

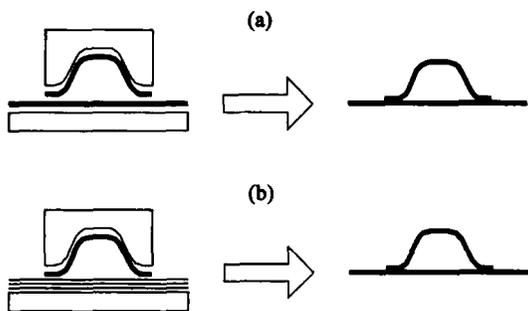


图 3 热压连接与共固结的对比

(a) 加压连接; (b) 共固结连接

Fig 3 Comparison of heat press jointing and co-consolidation

(a) heat press jointing (b) co-consolidation

2 成型工艺研究

预浸料成型的第一阶段,是通过预压将预浸料初步压紧,使各层预浸料形成需要的外形。采取热压成型时,先加热软化和熔化树脂,在表温达到玻璃化转变温度以上约 50°C 时停留一段时间,保证材料受热均匀;同时施加适度压力保证层间紧密接触并使各层舒展。接着升高温度,当温度高于熔点约 50°C 时开始保温足够时间,并加压到 0.5 MPa 保证树脂完全熔融并浸渍碳纤维束。接着缓慢降温控制

PEEK 结晶行为和 CF/PEEK 界面连接紧密。当结晶基本完成后降温速度可以加快,在制品温度低于玻璃化转变温度 30°C 时就可以脱模了。在进行快速冷却时略微降低压力以防压破制品。最后确定的复合材料热压成型工艺如图 4。

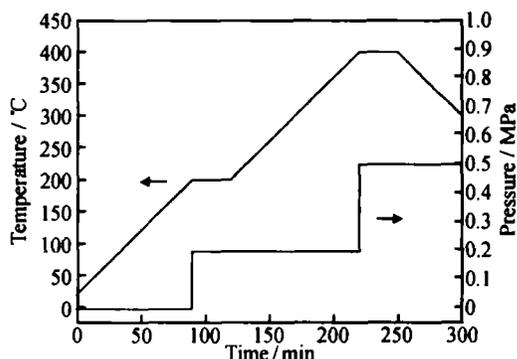


图 4 预浸料成型工艺

Fig 4 Processing cycle of the prepreg

实际上,只要对制品结构质量有影响的,必然对制品性能有影响。因此,在成型研究中总是对制品进行 C-扫描以便控制制品质量,从而回馈分析成型工艺规程是否合适。实验发现最高成型温度和适当的压力以及停留时间是控制制品质量和性能的基本要点;而加热速率、冷却速率和加压速率等则是第二级控制要素;模具材料和结构也影响制品的表面质量及成型工艺。另外,基体树脂、增强纤维的类型、含量、预浸料的形式以及层合方式决定这些工艺参数的选取,从而直接和间接控制复合材料的性能质量。

3 二次成型与共固结技术

热塑性复合材料具有损伤容限高,抗冲击性能好的特点,适宜用于口盖等易遭受反复冲击的部位。首先制备一个比较典型的带“L”加强筋口盖,平板厚度 2.5 mm ,加强筋厚 2 mm 。这里以它作为典型件,进行二次成型技术和共固结技术的制造验证。

3.1 二次成型制备“L”加强筋

“L”加强筋是一个较为简单的平板弯折结构,非常适合二次成型。

首先,根据一次获得两个加强筋坯材的需要,确定初次成型的平板幅面。按照设计部门提供的铺层结构 $[90^{\circ}/-45^{\circ}/+45^{\circ}/0^{\circ}]_2$ 在平板模具中铺贴预浸料,然后采用模压工艺制得平板。

加强筋的二次成型是利用如图 5 所示的模具完成的。下模为“L”型槽,上模为“L”型凸台。上、下模通过垂直面加导柱限制仅上下移动而控制制品的 90° 形状精度;上、下模的水平配合工作面接是下

极限位,控制制品的厚度 ($2\text{ mm} \pm 0.05\text{ mm}$)。

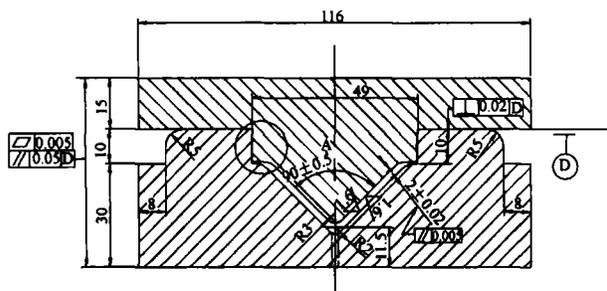


图 5 “L”加强筋二次成型模具正面剖视图

Fig 5 Cross-sectional view of the secondary forming mold

将前一步制得的平板裁成与加强筋尺寸相近的板条,装卡在二次成型模具中,一同在压机中缓慢升温到 380°C 。升温过程中,应保证上、下模与压机的上、下加热台面保持适当接触,确保有效传热;但是不要使板条承受过大载荷,以避免复合材料在树脂熔融流动前发生明显变形,影响成型质量。达到设定温度后,基体树脂已经软化,板条在上模自重的作用下即已产生一定程度的弯曲。此时控制压机缓慢合模,将复合材料板条压至最终的角度。恒温 30 min 后,即可在保持压力的条件下自然降温冷却。

弯曲成型后的“L”型加强筋去毛边,C扫描检验合格后,裁切成适当尺寸的制品。制备的“L”型加强筋尺寸准确,圆角过渡处压实,表面质量好(图 6)。



图 6 二次成型制备的“L”型加强筋

Fig 6 L stiffener manufactured by secondary forming

3.2 共固结制备口盖

共固结模具采用上下模结构。下模板和中模框通过螺栓连接成下模,可拆卸脱模和清理模具。为固定两根加强筋,上模分割成三块,通过螺栓连接,两块间留有容纳加强筋的空间。成型前,把切割成合适尺寸的加强筋分别固定在两块分切面处,然后上紧螺栓,保证三块工作平面和加强筋底面在一个平面。接下去的操作则可按照平板热压成型工艺进行。成型后按照装模的相反顺序分解各组成部分,可避免脱模时损伤与模具有多个接触面的制件。这样设计的模具装配图见图 7。

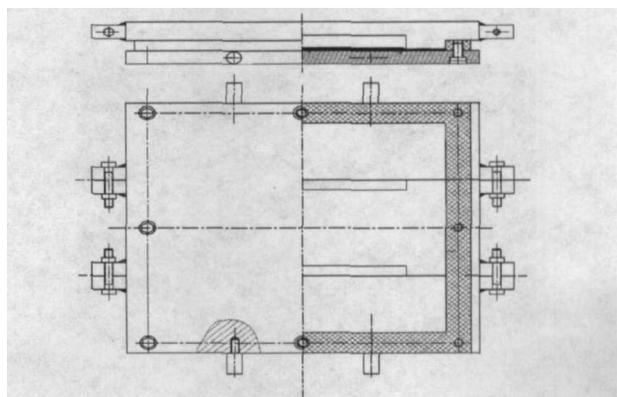


图 7 共固结成型模具图

Fig 7 Cross-sectional view of co-consolidation mold

进行共固结操作时,按照铺层设计和成型件平板部分的尺寸剪裁预浸料,并按照设计的铺层顺序依次铺放到下模中。将切割成合适尺寸的两根加强筋与上模的三个组成部分拼接成整体。合模,按照图 4 所示的工艺进行热压成型。

冷却脱模后,按照设计单位提供的图纸切割边角,得到图 8 所示的典型结构件。

4 曲面成型与热压连接

柔性预浸料曲面铺放便于制备带有较复杂曲面的结构。一个比较典型的例子是带有帽型材的加筋

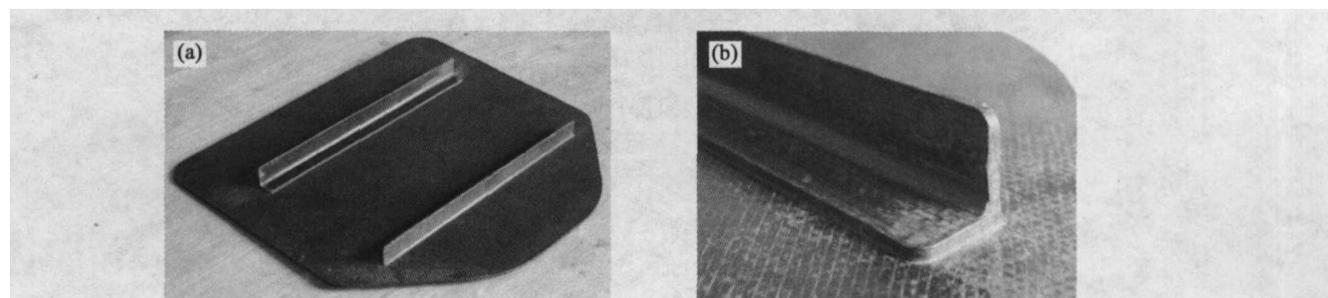


图 8 带“L”加强筋的口盖典型件

(a) 口盖概貌; (b) 连接部位

Fig 8 Stiffened panel with L stiffener

(a) stiffened panel (b) stiffened panel

口盖。成型过程是先分别制备口盖板以及两个帽型材,然后通过热压连接形成最终制件。

口盖板是一个简单的平板结构,可以很方便的利用模压工艺制备。

加强筋为带有 R3和 R5圆角过渡的阶梯结构,尺寸要求也比较精细。首先设计并制造帽型材的成型模具组(如图 9)。按照铺层设计和加强筋的尺寸剪裁预浸料,并按照设计的铺层顺序逐层铺放到成型模具的下模上,适度施加压力,使柔性预浸料变形贴合到模具工作面上。操作过程中注意用力均匀,防止预浸料出现面内变形,影响铺层的方向准确度。

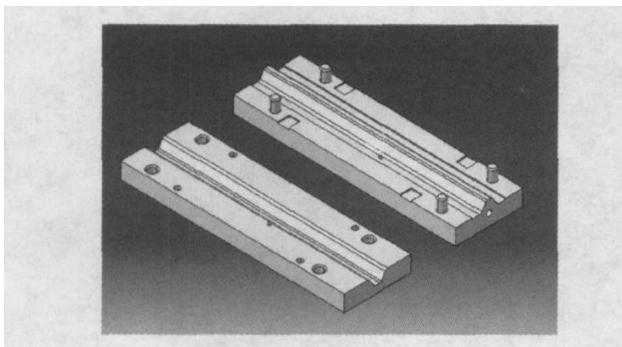


图 9 帽型材成型模具组

Fig 9 Mold for U Stiffer

热压连接模具的主体由上模和下模构成。下模上开有与帽型材外部尺寸相同的槽,用于容纳加强筋并对其传热。加强筋放入槽中,其两翼应与下模的工作面平齐。上模与下模工作空间的距离与目

标口盖的厚度相当,放入复合材料平板后可对其均匀传热并使加压力。为防止基体树脂受热软化后发生额外变形,同时为了使加强筋内部的受热更均匀,在平板与帽型材之间的空间内放置了支撑条。完全组装好的热压连接组合体如图 10所示。

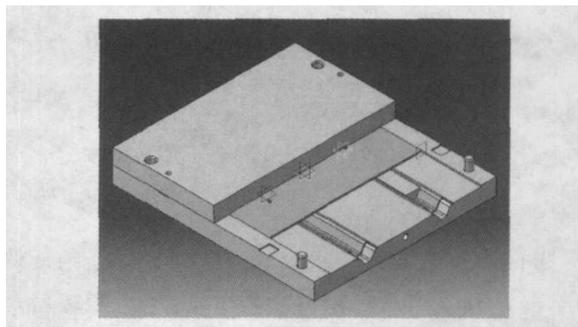


图 10 热压连接机构示意图

Fig 10 Heat press jointing set

将帽型材放在下模的槽中定位,放入支撑条。在帽型材的两翼上撒上少量 PEEK 粉末,增加它与平板的连接强度。放上平板,盖好上模,无压升温至 200℃,保持 30 min 保证制件整体温度达到 T_g 以上 50℃;加压至 0.2 MPa 确保帽型材与平板制件紧密接触;继续升温至 400℃,保持 10 min 使复合材料充分软化后,加压至 0.5 MPa 并停止加热,自然降温冷却。

制得的带帽型材加筋口盖典型件质量良好,连接紧密,尺寸控制准确。其全貌及连接细节照片见图 11。

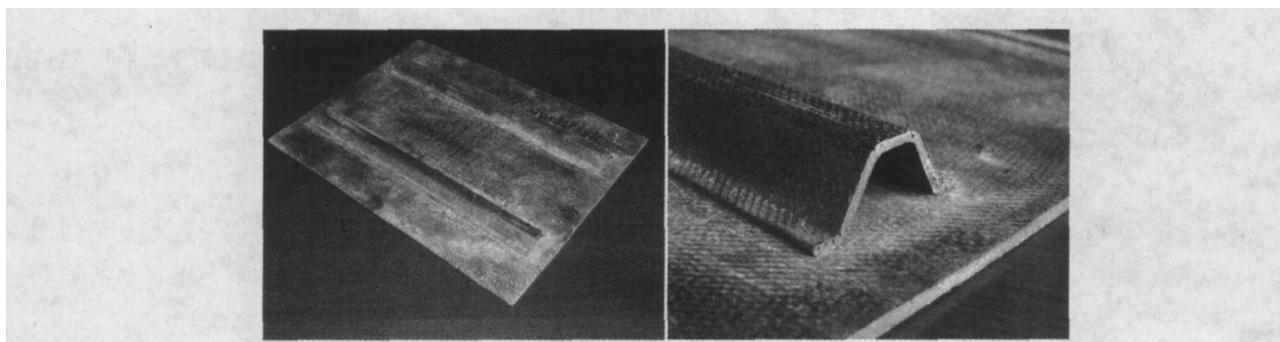


图 11 典型件及连接部位细节

Fig 11 Stiffened panel with U stiffer and detail of jointing

5 结 论

通过典型件的制备证明,混编法生产的柔性预浸料具有出色的曲面铺覆性能,有效解决了 PEEK 树脂基复合材料工艺性较差的问题。通过热压成型工艺和热压连接工艺的结合,可以高质量高效率地实现较复杂结构的制造。

参考文献:

- [1] 张凤翻,李元珍,娄葵阳,等. PEEK 基体热塑性树脂基复合材料的研究[J]. 材料工程, 1996, 6: 40-44.
- [2] 赵巍,杨德安,梁崇,等. PEEK 及其复合材料的研究与应用[J]. 材料导报, 2003, 17(9): 68-70.
- [3] APG-2 Data Sheet ICI Fiberite
- [4] D Bhattacharyya Composite Materials Series Vol 11:

Composite Sheet Forming [M]. Elsevier Science B. V. 1997.

技术制造热塑性复合材料加筋结构 [J]. 航空材料学报, 2005, 25(3): 16-20

[5] 王克俭, 益小苏, 唐邦铭, 等. 用共固结和热变形成型

Manufacture of Thermoplastic Matrix Composite Stiffened Panel Using Flexible Co-woven Prepreg

AN Xue-feng ZHANG Ming TANG Bang-ming YI Xiao-su

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract PEEK matrix composites exhibit great toughness and damage resistance. But the severe processing conditions and poor drapability result in inefficiency in curved surface forming. This difficulty can be solved by flexible co-woven prepreg technology, facilitating the manufacture of complex curved surface structure with high quality and efficiency. The advantage of this flexible prepreg was demonstrated through the manufacture of stiffened panels with L stiffeners and U stiffeners, respectively.

Key words thermoplastic matrix composite; flexible prepreg; curved surface forming; co-consolidation