

# 复合材料帽形框架整体成型技术

谭放

(北京空间机电研究所,北京 100076)

**文 摘** 介绍了某帽形框架整体成型技术,工艺设计中的模具结构形式、预浸料铺叠方式以及帽形框架在蜂窝结构板中的增强效果;对帽形框架的应用进行了分析。结果表明:帽形框架整体适合于平面结构,结构设计灵活,成型工艺性好,具有很大的应用潜力。

**关键词** 复合材料,帽形整体框架,成型技术

## Integral Forming of Technique Cap-Shaped Composite Frame

Tan Fang

(Bingjing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100076)

**Abstract** The integral forming technique of cap-shaped frame, the structure of mould in process design, and the form of spread out the prepreg, the effect of the honeycomb sandwich construction are introduced. The stren of cap-shaped frame was analysed. These results indicated that the forming technique had large potentialities of the integral forming technology of cap-shaped frame

**Key words** Composite, cap-shaped integral frame, Forming technology

### 0 引言

某型号光学遥感器支撑底板为碳纤维树脂基复合材料面板/铝蜂窝夹层结构,为了提高相机支撑底板的局部强度和刚度,在底板与相机连接的部位增加埋设了截面为帽形的碳纤维树脂基复合材料整体加强梁。这种截面为帽形的碳纤维树脂基复合材料整体框架(图1、图2)所采用的成型方法实际上仍然是采用铺叠-真空袋热压罐法成型,所不同的是采用整体成型的方法制造框架结构。本文就对该帽形整体框架的制造技术进行介绍。

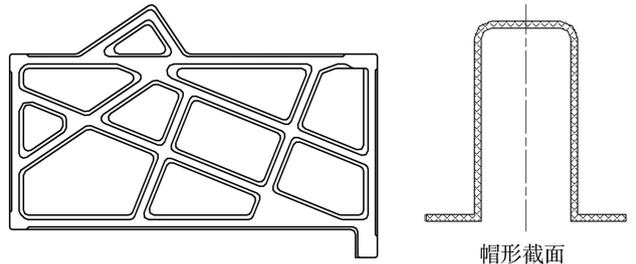


图2 碳纤维复合材料帽形整体框架示意图

Fig. 2 Carbon fiber composite cap-form single frame diagram

### 1 碳纤维复合材料帽形框架整体成型技术

#### 1.1 材料

为保证光学遥感器底板的强度和刚度,碳纤维复合材料帽形框架采用 M55J 高模量碳纤维作为增强材料,表1为 M55J 的基本性能。采用的树脂基体为环氧 648-三氟化硼单乙胺(F46/BF<sub>3</sub>·MEA)胶液体系,表2为环氧 648/BF<sub>3</sub>-MEA 浇注体拉伸性能。

表1 M55J 纤维基本性能

Tab. 1 Basic properties of M55J fibre

拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /GPa	密度 /g·cm <sup>-3</sup>	断裂伸长 率/%
4020	540	1.91	0.8

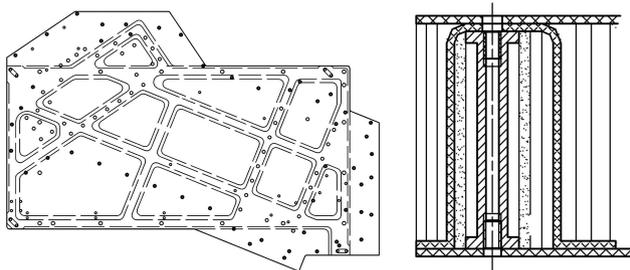


图1 某蜂窝夹层结构光学遥感器底板结构示意图

Fig. 1 Honeycomb sandwich panel for optical remote sensing of space constructed profile

收稿日期:2013-06-13

作者简介:谭放,1957年出生,高级工程师,主要从事复合材料成型工艺研究。E-mail:tanfang1957@foxmail.com

表 2 环氧 648/BF<sub>3</sub>-MEA 浇注体拉伸性能

Tab.2 Tensile properties of epoxy(648/BF<sub>3</sub>-MEA)

resin casting body			
拉伸强度	弹性模量	密度	泊松比
/MPa	/GPa	/g·cm <sup>-3</sup>	
34.3	3.04	1.23	0.28

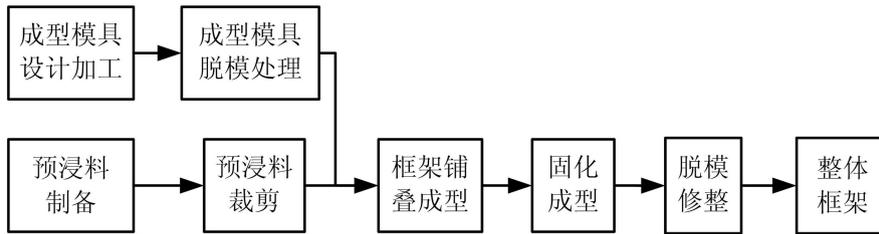


图 3 帽形整体框架成型流程图

Fig.3 Flow diagram of cap-form single frame

### 1.2.2 预浸料制备

将 F46/BF<sub>3</sub>·MEA 胶液调配密度为 (0.935 ± 0.005)g/cm<sup>3</sup>,并在纤维排布机上制作无纬布。预浸无纬布制作好后,用差示扫描量热仪检测树脂基体材料的 T<sub>a</sub>(起始点温度)、T<sub>b</sub>(峰顶温度)、T<sub>c</sub>(外推终止点温度)数值,供固化成型中工艺参数选择。预浸布相应指标如表 3 所示。

表 3 M55J 预浸无纬布参数

Tab.3 Parameters of M55J unidirectional fabric prepreg

纤维	螺距	面密度	预浸料含胶量/%
	/mm	/g·m <sup>-2</sup>	
M55J-6K	1.53	143±3	38 ±3

### 1.2.3 裁剪铺叠

对预浸料裁剪,并进行帽形整体框架铺叠。

框架铺叠形式: [ +45°/-45°/0°/90°/90°/0°/-45°/+45° ]<sub>T</sub>。

### 1.2.4 固化成型

帽形框架铺叠完成后,放上加压边条及盖板,封装真空袋,然后进罐固化。

固化工艺:170℃/2 h。

固化后对帽形框架进行脱模并修整,成型完毕。图 4 为某型号相机支撑底板,图 5 为支撑底板中的帽形框架。

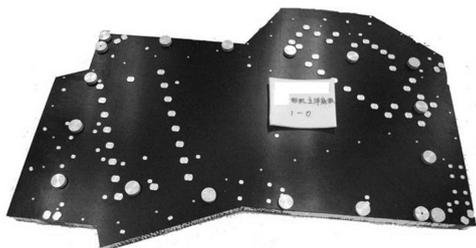


图 4 某型号光学遥感器支撑底板

Fig.4 Bearing plank for the remote sensing of optical

## 1.2 成型工艺

### 1.2.1 成型工艺流程

帽形整体框架的成型工艺流程如图 3 所示。



图 5 支撑底板中的帽形框架

Fig.5 Frame of cap-form among the bearing plank

### 1.3 帽形整体框架成型技术

帽形整体框架采用的是铺叠-真空袋热压罐法成型,总体成型工艺与通常的预浸料铺叠、真空袋-热压罐法无区别。但是由于其中的帽形框架形状复杂,整个成型过程需要解决两个问题:一是成型模具的结构形式;二是帽形框架的铺叠成型。

#### 1.3.1 成型模具

对于帽形框架成型模具,由于杆件分叉多、拐角多,造成结构复杂,固化成型时受力方向多,因而在模具设计中主要考虑两个方面的问题:一是固化加压,如何保证在固化过程中对帽形框架不同区域的有效加压。如果仅仅采用真空袋-压板对制件的帽形各个面加压(图 5),由于其框架网格多,真空袋起伏多,并且帽形翻边较窄等因素,极易在帽形翻边拐角处形成真空袋架空现象,从而引起该制件区域因压力不足而产生空隙和富胶等缺陷,并且在帽形翻边处也不易压平,往往在拐角处较厚,而边缘较薄,为此在模具设计时考虑有效的加压方式,利用膨胀橡胶在固化升温中的膨胀对帽形框架的侧壁施加压力,而帽形顶面和翻边采用刚性金属模加压解决上述问题,如图 6 所示;二是对于矩形截面的帽形框架固化成型后如何能够顺利地将整体框架从模具上脱出来。由于铺叠操作空间及结构复杂性的限制,帽形框架往往采用在芯

模上铺叠的工艺方法。其模具为阳模。通常框架结构每三或四个杆件形成闭合网格结构,当采用金属模具成型帽形框架时,由于固化过程中材料与模具制件膨胀量的差异,固化后封闭的碳环氧制件紧紧地卡在模具上,框架上的各个网格相互牵制,从而无法将制件从模具上脱出。因此在进行模具设计时,可以考虑将芯模断开,变整体脱模为分体脱模,从而使得脱模变得相对简单,可以有效地解决这个问题。

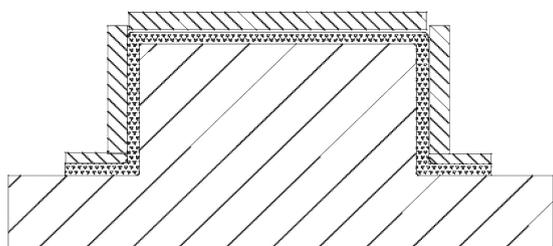


图6 真空袋-压板式加压结构

Fig. 6 Form of vacuum bag/plate to pressing

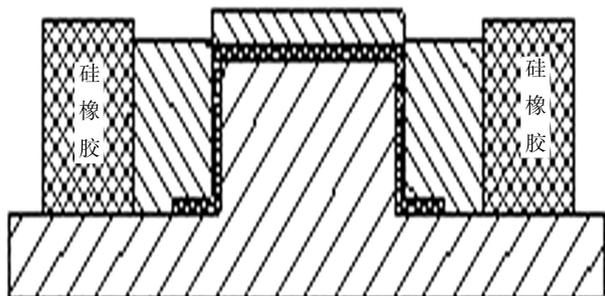


图7 真空袋-压板硅橡胶混合式加压结构

Fig. 7 Mixing of vacuum bag/plate to pressing bag/plate moulding

### 1.3.2 帽形框架的预浸料铺叠

复杂的帽形框架结构是由多个闭合网格组成,每三或四个杆件形成闭合网格结构,通常情况下帽形框架中的闭合网格并非正交的较为规整的形式,因此其铺层的要点在于铺层基准的确定和杆件交叉处的铺叠处理原则。

#### 1.3.2.1 铺叠角度的确定

无论框架杆件之间是否相互垂直、杆件截面是否相同以及杆件的壁厚是否一致,均视框架中每两个交叉点之间的那一段为单个杆件进行铺叠,并将帽形杆件分为顶面、侧壁和翻边三部分,其铺叠角度以平行于杆件的轴向为预浸料铺叠的 $0^\circ$ 基准,垂直于底面或垂直于轴向为 $90^\circ$ ,以此确定其他角度的铺叠,杆件交叉处预浸料铺叠原则是尽量保证铺叠纤维的连续性。

#### 1.3.2.2 $0^\circ$ 层的铺叠

对于帽形杆件的顶面部位 $0^\circ$ 层的铺叠,当两相

邻杆件相交角度不大时,该杆件顶面的 $0^\circ$ 层铺叠尽量使之延续到相邻杆件的顶面上,保证纤维的连续性,见图8,图9;当两相邻杆件相交角度较大时,该杆件顶面的 $0^\circ$ 层铺叠到交叉处将其铺叠到侧壁及翻边上,使之形成 $90^\circ$ ,见图8和图10;帽形杆件的侧壁部位 $0^\circ$ 层的铺叠,则围绕帽形的侧壁水平方向进行铺叠为 $0^\circ$ 层;而帽形杆件的翻边部位 $0^\circ$ 层的铺叠,则与顶面铺叠类似。

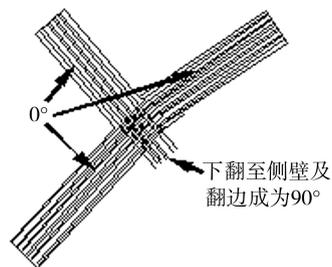


图8 杆件顶面三杆交叉 $0^\circ$ 层铺叠

Fig. 8 Layer of  $0^\circ$  is layed at the beams top in case of three beams crossing

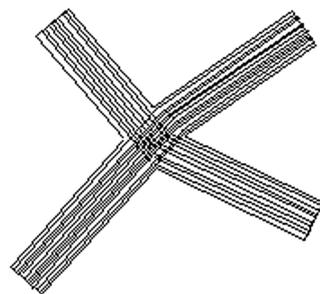


图9 杆件顶面四杆交叉 $0^\circ$ 层铺叠

Fig. 9 Layer of  $0^\circ$  is layed at the beams top in case of four beams crossing

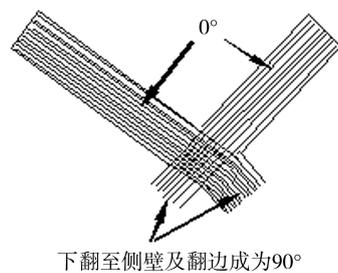


图10 杆件顶面两杆交叉 $0^\circ$ 层铺叠

Fig. 10 Layer of  $0^\circ$  is layed at the beams top in the case of two beams crossing

#### 1.3.2.3 $90^\circ$ 层的铺叠

对于帽形杆件 $90^\circ$ 层的铺叠,相对简单,围绕“杆件”的轴向铺叠。对于“杆件”的交叉处,将 $90^\circ$ 层未覆盖区域补齐即可。当交叉角度较大时,如两杆交叉、三杆交叉和四杆交叉,其交叉点两个方向的 $0^\circ$ 可互为 $90^\circ$ ,见图8~图10。

#### 1.3.2.4 角度层的铺叠

帽形框架角度层一般以 $45^\circ$ 为宜,这主要基于两点考虑:一是 $45^\circ$ 在铺叠时与 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 组合,类似于准各向同性铺层,对称性较好,杆件的综合力学性能较好;二是当框架上的杆件相互垂直时, $45^\circ$ 在转向后仍然是 $45^\circ$ ,铺叠时角度保证相对容易。帽形框架角度层在“杆件”交叉处铺叠为便于操作和防止混乱,一般在两“杆件”交叉的拐角处断开拼接,见图 11。为了加强两“杆件”交叉的拐角处的强度,在杆件 A 的 $+45^\circ$ 和杆件 B 的 $-45^\circ$ 偏差不大时,可以采用图 12 所示的方式进行铺叠,前提是铺层不能混淆。

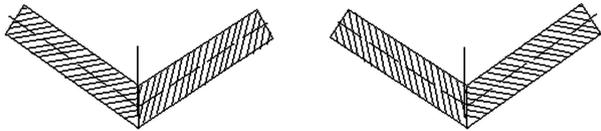


图 11 铺层在杆件交叉部位断开的情况

Fig. 11 Layer is broken in the case of beams crossing

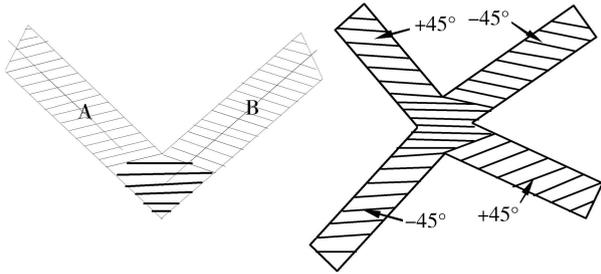


图 12 铺层在杆件交叉部位未断开的情况

Fig. 12 Layer is not broken in the case of beams crossing

交叉区域的加强。在可能的情况下,框架“杆件”的交叉区域可以有意识地进行加厚补强,即在芯模的顶面和两个侧面,相应位置去掉 $1 \sim 2 \text{ mm}$ ,铺叠时专门在此区域进行各个方向的连续铺叠,以确保交叉区域的强度。

### 1.3.2.5 帽形框架的增强效果

利用软件 MSC. Patran、MSC. Nastran 对蜂窝夹层结构相机底板结构进行力学仿真分析<sup>[1]</sup>,表 4 中记录了有、无帽形整体框架两种状态,光学遥感器底板的一阶基频和最大变形。

表 4 光学遥感器底板力学仿真分析表

Tab. 4 List of mechanics emulation for the bearing plank

状态	一阶基频 /Hz	最大变形 / $\mu\text{m}$
无帽形整体框架底板	60.1	60.8
有帽形整体框架底板	81.6	29.2

由仿真计算表明通过增加帽形加强框架,碳面板/铝蜂窝结构底板的刚度得到了较大幅度的提高,其一阶基频由 $60.1 \text{ Hz}$ 提高到 $80.6 \text{ Hz}$ ,提高幅度约为 $35\%$ 。其最大变形由 $60.8 \mu\text{m}$ 减至 $29.2 \mu\text{m}$ ,最大变形量不到无帽形加强框架底板的一半。底板经历振动试验,实测基频约为 $75 \text{ Hz}$ ,反映出仿真计算与实际试验结果比较吻合,效果良好。

由此可知,碳纤维复合材料帽形加强框架相对传统框架更加适用于平板状的碳/环氧复合材料面板蜂窝夹层结构,结构设计灵活,成型工艺性好。

## 2 帽形整体框架的扩展应用

帽形整体框架目前已经应用于几个型号的空间遥感相机支撑底板上,效果良好。由于帽形整体框架本身是一种梁类结构,因此除了在蜂窝结构板中作为加强梁应用外,还可将其扩展用于平面桁架结构,如只需在帽形框架的下面增加一个与其帽形翻边外形相同的框式平面层合板,通过粘接组合形成闭合结构,如图 13 所示。帽形整体框架闭合结构是一种广义上的桁架结构<sup>[2]</sup>,桁架结构,尤其是复合材料桁架结构由于空间设计灵活、开放式结构便于总体装配及便于重构等特点,因而在各类卫星和航天器中被广泛采用。实际应用中有大量的平面桁架结构,如某型号的太阳电池阵基板连接架、太阳翼压紧框架等,见图 14、图 15。即使是对于一些形状较为复杂的立体桁架结构,也可以将其分开简化成几个平面桁架结构,然后再经过粘接及机械连接形成立体桁架结构,由此将大大降低立体桁架结构的制造成本,质量也可控制在一定的范围内。

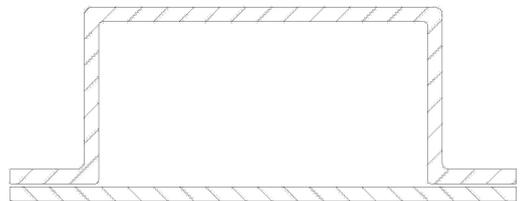


图 13 帽形整体框架闭合结构截面示意

Fig. 13 Closed framework of cap-shape for cutaway diagram



图 14 某太阳电池阵基板连接架

Fig. 14 Linking frame for panel of solar cell



图 15 某型号太阳翼压紧框架

Fig. 15 Tighting frame for solar wing

综合来说,帽形整体框架闭合结构在制造上具有如下优点:

(1)简化了结构装配,采用帽形整体框架闭合结构成型技术制造的框架结构其基本装配零件仅有帽形框架和框式平面层合板,胶接连接时只需两者对齐即可,从而使得结构的连接装配大大简化;

(2)减轻了结构质量,帽形整体框架闭合结构,仅有帽形框架及其下面的底板,零件数量少,从而减轻了结构质量;

(3)提高了结构的可靠性,采用帽形整体框架闭合结构仅仅是帽形框架与框式平面层合板的平面胶接连接,胶接质量容易控制,胶接可靠性高;

(4)提高了结构可设计性,采用帽形整体框架闭合结构成型技术,由于是整体成型,没有结点处接头的干扰,几乎可以任意设计;此外采用框架整体可以根据需要加宽或缩窄以及加厚或减薄,也可以根据需要任意增加设计连接点,从而更具可设计性;

(5)降低制件的制造成本,采用帽形整体框架闭合结构成型技术制造的框架结构一是基本装配零件

仅为帽形框架和底板,零件数量减少;二是减少或简化了桁架组合胶接的定位工装;三是由于零件数量减少,结构制造所用的时间相应的也减少;四是避免了由于采用金属接头带来的电化学腐蚀问题。所有这些零件、加工、工装、装配、时间减少以及相应减少诸多因连接带来的种种麻烦,最终使得制造成本降低。

### 3 结论

(1)碳纤维复合材料帽形梁整体框架适合于平面结构,结构设计灵活,成型工艺性好。

(2)帽形整体框架成型是一种设计理念的转变,帽形框架与框式层板组合而成的桁架结构特别适合于平面类桁架结构,尤其是与将其框式平面层合板结合用于桁架结构,在通常的情况下可以替代传统的空心管/接头形式的桁架结构。

(3)帽形整体框架成型技术还处于发展初期,尚有许多需要改进的地方。如可以采用编织与缝合技术,应用高性能的用于 RTM 成型的树脂,低成本的真空中导流成型技术以及硅橡胶芯模、水溶性芯模技术,这些技术的综合应用可以完善成型技术,也大大地提高帽形框架的质量。

(4)整体框架成型技术的应用前景具有很大的潜力。

### 参考文献

[1] 房海军. 几字型加强框架在空间高稳板型结构中的应用[C] //2010 年第十三届全国空间探测学术交流会议论文

[2] 周徐斌. 卫星桁架结构技术综述[C] // 2006 - 中国宇航学会飞行器总体专业委员会 2006 年学术研讨会

(编辑 李洪泉)