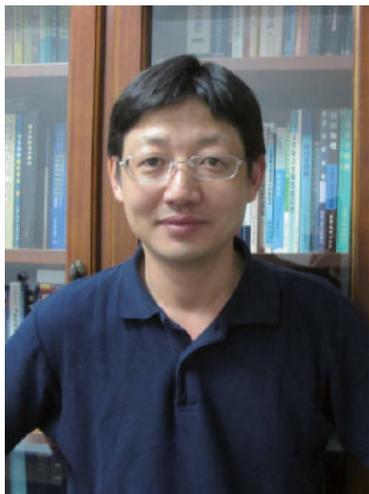


# 飞机夹层结构的设计和 泡沫芯材的选择

Design of Sandwich Structure and Selection of Foam Core  
Material for Aircraft

赢创德固赛(中国)投资有限公司上海分公司 胡 培



胡 培

赢创德固赛(中国)投资有限公司高性能聚合物业务部门中国区航空材料产品总监,主要从事复合材料芯材的研究和市场开发。

## 飞机夹层结构应用情况 和芯材的对比

在飞机设计中要求设计的构件尽可能轻而不损失强度是对设计人员的最大挑战,这就要求所设计的薄壁结构在承受拉、压及剪切载荷的综合作用下不失稳。过去传统的飞机结构设计方法仍在一些范围内使用,例如通过用长桁和肋/框组成纵、横向加强件来提高板的稳定性。实际上,某些次结构也可以使用夹层结构

在夹层结构设计中使用泡沫芯夹芯不仅可以降低制造成本,而且也可以降低飞机全寿命维修成本。在设计时应该进行综合比较泡沫芯夹层和蜂窝芯夹层结构的不同特点,正确选择应用部位和结构方案,使用正确的夹层结构设计方式和芯材。

设计来满足强度、刚度要求。

飞机的复合材料夹层结构通常采用先进复合材料做面板,其夹芯为轻质材料。夹层结构的弯曲刚度性能主要取决于面板的性能和两层面板之间的高度,高度越大其弯曲刚度就越大。夹层结构的芯材主要承受剪应力并支持面板不失去稳定性,通常这类结构的剪切力较小。选择轻质材料作为夹芯,可较大幅度地减轻构件的重量。当然,对于面板很薄的夹层结构,还应考虑抗冲击载荷的能力,所以面板的最小厚度必须满足一定的条件。此外,夹层结构的使用经验还表明:在从成本方面评估夹层结构时,不仅要考虑制造成本,还必须考虑飞机使用期的全寿命成本。

目前,飞机夹层结构主要的使用位置有:起落架舱门、雷达罩、地板、发动机短舱、飞行控制面(襟翼、副翼、升降舵、扰流板等),翼身整流罩、

翼稍小翼以及用于加强壁板和蒙皮的泡沫填充帽形加筋条。图1和图2分别为A380蜂窝结构复合材料的使用情况。夹层结构的夹芯通常采用蜂窝或泡沫芯材。

通常在飞机夹层结构设计中,泡沫材料的密度( $50\sim 80\text{kg}/\text{m}^3$ )比蜂窝( $48\text{kg}/\text{m}^3$ )要高,剪切强度也低于同样密度的蜂窝材料,这也是目前蜂窝材料的应用多于泡沫材料的原因。但是泡沫材料在工艺、设计和使用过程中,也有其独特的优势。

目前,航空航天结构中最常用的泡沫芯材是德国罗姆公司生产的PMI泡沫材料。PMI泡沫材料在进行适当的高温处理后,能承受高温的复合材料固化工艺要求,这样使得PMI泡沫在航空领域得到了广泛的应用。中等密度的PMI泡沫材料具有很好的压缩蠕变性能,可以在 $120\sim 180^\circ\text{C}$ 温度、 $0.3\sim 0.5\text{MPa}$ 压力下

表1 夹层结构主要设计形式

设计	示意图	刚度	重量	铺层工作量	组装工作量	适合的芯材
全高度夹层结构(图3)		++	+	++	++	蜂窝和泡沫
蒙皮夹层结构(图4)		+	++	+	0	蜂窝和泡沫
泡沫填充帽形加强筋条,(图5(d))		+	+	0	++	泡沫

■ 蜂窝夹层结构



图1 A380-800中蜂窝夹层结构的使用情况

- 玻璃纤维增强复合材料
- 石英纤维增强复合材料
- 碳纤维增强复合材料
- 金属
- 玻璃纤维混杂复合材料层板



图2 A380-800材料的使用情况



图3 EMBAER 145平尾的后缘设计



图4 湾流G150翼身整流罩

热压罐固化。PMI 泡沫材料能满足通常的预浸料固化工艺的蠕变性能要求。

从工艺角度讲,与泡沫材料相比,蜂窝材料机械加工相对简单;对于复杂形状,可以通过热成型的方法对芯材成型。与蜂窝夹层结构相比,泡沫夹层结构能够适应更高的共固化温度和压力,不需要填充处理。在同样的共固化条件下,泡沫夹层结构的复合材料蒙皮的力学性能相对要高。另外,泡沫芯材还能直接用于各种液体树脂成形工艺,例如各种树脂转移模塑工艺等。

从设计角度讲,除了常用的全高度夹层结构和蒙皮夹层结构外,还可以设计泡沫填充帽形加强筋条结构。另外,泡沫材料的力学性能是各向同性的,而蜂窝是各向异性的。在复杂受力状态(例如翼梢小翼结构中)下,泡沫材料比蜂窝更能满足结构和强度的要求。

在使用过程中,与开孔的蜂窝结构相比,泡沫材料因为是闭孔结构具有较低的吸水率,可减少维修成本。

### 夹层结构主要设计形式

夹层结构主要设计形式如表 1

所示。图 3、图 4 中平尾的后缘结构设计方式,属于局部全高度夹层结构。对结构高度大的翼面结构,蒙皮壁板(尤其是上翼面壁板)采用夹层结构能明显减轻重量。对于结构高度小的翼面结构(尤其是操纵面),采用全高度夹层结构代替梁肋式结构也能带来明显的减重效果。夹层结构最大的优点是具有较大的弯曲刚度和强度。

在弯曲和轴向压力作用下,薄壁复合材料结构常常会发生稳定破坏,失稳破坏总是在材料到达压缩破坏强度以前、在受压部位出现,为此工程师常常设计加强筋条结构。对于常用的加强板,有 4 种设计方法。图 5 (a) 中,加强板分 3 步制造,包括面板固化、加强筋固化和二次胶接。尽管可以通过一些高效率、低成本的方法(例如挤出工艺)制造出加强筋,但是由于采用了二次胶接,抵消了成本优势。另外一种方法是加强筋和面板采用共固化工艺,如图 5 (b) 所示,设计中可以

采用和树脂有相同固化周期的胶膜来提高胶接面整体性。加强筋可以经过预固化或未经预固化,这样加强筋和蒙皮可结合在一起。图 5(c)中,增加了设计尺度,这也带来微观的设计。图 5 (d) 是放弃整个 I 形加强筋的概念、采用泡沫填充帽形加强筋条的设计方法,与空心的帽形加强筋条结构相比,避免了帽筋条的侧壁产生失稳而导致结构过早破坏。

与空心加强筋条相比,泡沫填充帽形加强筋条的面内压缩强度在结构出现初始失稳时,失稳载荷提高约 100%。芯材主要承受和加强筋侧表面垂直的拉应力和压应力,避免在碳纤维 / 环氧树脂复合材料面板达到屈服强度前结构过早地发生失稳破坏

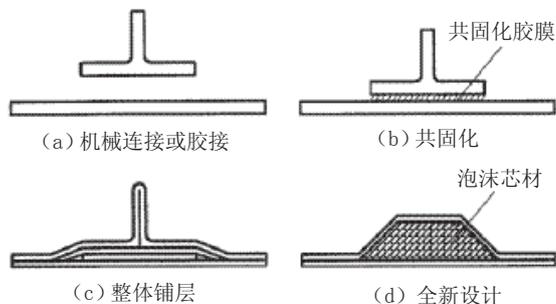


图5 加强板的设计

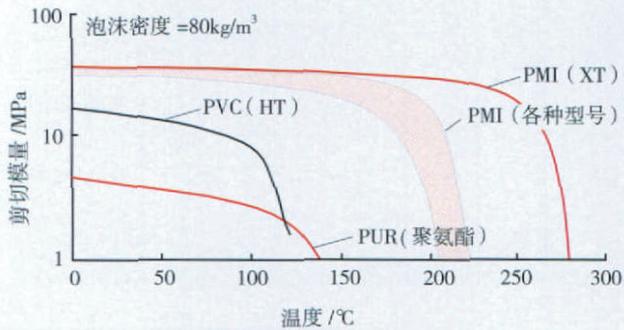


图6 动态剪切模量-温度关系曲线

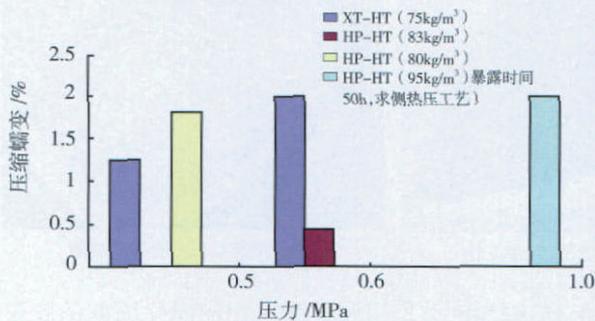


图7 ROHACELL HP型号在热压罐条件下的压缩蠕变

外,还需要确认泡沫芯材能不能满足特殊制造工艺的要求。在夹层结构固化过程中,泡沫必须能够在一段时间内,承受温度和压力的综合作用。耐蠕变性能是决定夹层结构构件制造过程可靠性和重复性的重要指标。

德国罗姆公司进行了一系列的试验,在对几种常见的泡沫塑料测试的基础上得出如表2所示的结论。如果使用Hexel公司的RTM 6树脂或3M公司的

PR500树脂先进RTM(树脂转移模塑)工艺,注射压力和温度:0.6 MPa、180°C,后固化温度:180°C。

在125°C /0.3MPa/2h固化条件下,PMI泡沫(密度>70kg/m³)是最好的芯材材料。如果固化压力降低到0.2MPa、80kg/m³,PVC HT也能适用。对于使用压力罐固化,固化温度

在130°C以上的环氧预浸料夹层结构,只有PMI泡沫能满足要求。密度大于110kg/m³的PMI WF-HT类型泡沫能够满足180°C/0.7MPa/2h的固化工艺,压缩蠕变低于1.5%。针对航天结构,如果采用RTM工艺,密度≥70kg/m³的PMI WF类型的泡沫完全能满足工艺要求。由于聚氨酯和PVC耐蠕变性能的局限性,工艺过程的温度不能高于130°C或采用先进RTM工艺。新的ROHACELL® XT类型的PMI泡沫甚至可以在190°C,0.7MPa和BMI树脂共固化,后固化温度达到230°C,充分利用BMI树脂的玻璃化转变温度。

### 选择正确的泡沫芯材

(1) 根据泡沫材料动态剪切模量选择泡沫的规格。

(2) 工艺要求。根据固化工艺的温度、压力和时间,确定满足压缩蠕变要求的泡沫规格和型号。

(3) 密度要求。通常选择的泡沫密度在50~80kg/m³之间。

(4) 树脂的粘度。例如液体树脂成形,推荐使用细小泡沫孔隙的RIMA或RIST型号,减少泡沫表面树脂吸收率,减轻结构重量。

### 最新的PMI泡沫规格型号

德国罗姆公司开发的最新型号ROHACELL HP,与过去WF和XT相比,相同的密度条件下具有更好的耐压缩蠕变性能,可以承受180°C/1MPa//2h的固化条件,见图7。

### 结束语

在夹层结构设计中使用泡沫芯材不仅可以降低制造成本,而且也可以降低飞机全寿命维修成本。在设计时应该进行综合比较泡沫芯材和蜂窝芯夹层结构的不同特点,正确选择应用部位和结构方案,使用正确的夹层结构设计方式和芯材。

(责编 小颖)

坏。

对于常用的夹层结构共固化工艺,例如泡沫填充帽形加筋条结构,芯材还作为蒙皮复合材料的芯模,起到工艺辅助材料的功能,在复合材料蒙皮或面板的固化压力和温度条件下,提供足够的尺寸稳定性,保证蒙皮或面板能够压实。与蜂窝相比,泡沫更加适合于共固化工艺。

### 常见的泡沫芯材在温度升高后的性能

除了室温下的力学性能,还需要考虑温度升高后夹层结构构件的整体性。这里采用动态剪切模量-温度曲线来比较泡沫的热力学性能,见图6。可见PMI、PU(聚氨酯)和PVC(聚氯乙烯)在温度升高的情况下,性能差异显著。

可以得出以下结论:只有PMI系列泡沫,也就是图中的网格部分,才能作为130°C以上使用的夹层结构芯材。在180°C时,PMI泡沫的性能才发生明显的降低。

除了前面讲述的物理性能以

表2 泡沫塑料测试结果

工艺类型	泡沫类型	压缩蠕变 /%
固化工艺 1 (125°C, 0.3MPa, 2h)	PU	>12 或材料压溃
	PVC HT (高温型号)	10
	PMI WF	1.5
固化工艺 2 (180°C, 0.7MPa, 2h)	PU	不能适用
	PVC HT (高温型)	不能适用
	PMI WF-HT*	3.5
	PMI WF-HT**	1.5

\* HT 表示经过热处理以后的材料: 130°C / 2 h、190°C / 48 h;

\*\* 密度 110 kg/m³。