

复合材料泡沫夹层结构 在民机中的应用

中航商用飞机有限公司 窦润龙 胡 塘

在飞机设计中要求设计的构件不但要做到尽可能的轻而且要不损失强度。这是对设计人员的最大的挑战,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。在目前过去传统的飞机结构设计方法仍然在一些范围内使用,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,在飞机设计中某些次结构也可以使用夹层结构设计来满足强度、刚度的要求。夹层结构的夹芯现在通常采用蜂窝或者泡沫芯材。

1 复合材料夹层结构

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。夹层结构的夹芯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。图1是A320飞机全高度泡沫夹层结构扰流板样件,图2是某飞机夹层结构的整流罩制件。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。

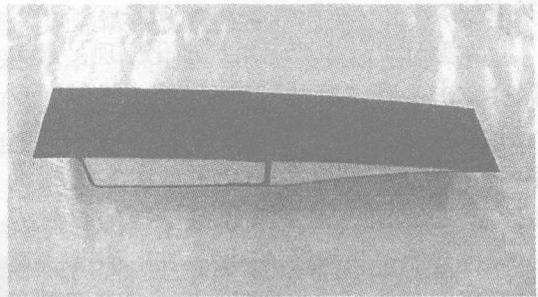


图1 A320飞机扰流片样件

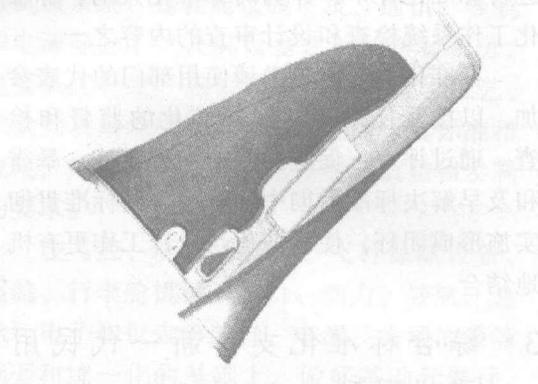


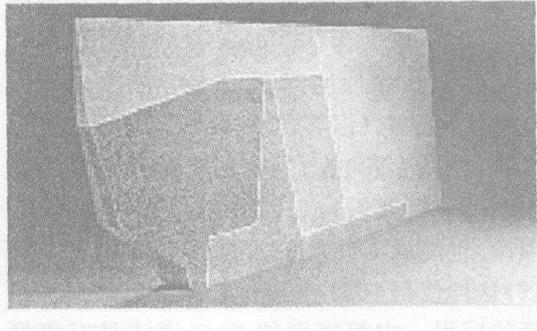
图2 夹层结构整流罩

2 夹心材料

在设计时,对于面板考虑的主要因素是材料的强度和刚度,而对于芯材,考虑的主要因素是最大幅度的减轻重量。在飞机结构中芯材通常使用铝蜂窝、泡沫或NOMEX[®]蜂窝,如图3所示。铝蜂窝或NOMEX[®]蜂窝具有压缩模量高和重量轻的优点,它们是飞机结构广泛使用的夹芯材料,通常与碳/

玻璃纤维预浸料一起使用。常见的结构有机翼前缘、方向舵、起落架舱门、翼身和翼尖整流罩等等。尽管蜂窝夹层结构在性能上比全金属板结构有突出的优点，但是各航空公司还是在积极寻找其替代材料，因为蜂窝夹芯材料在使用过程中需要高昂的维护修理费用。在某些情况下如果面板出现裂纹和孔隙时候，水和水汽就很容易地进入到蜂窝。在低温情况下，进入蜂窝孔中的水被冰冻以后会发生膨胀，将破坏邻近的蜂窝孔格的粘结，这就降低了夹层结构的性能而必须进行修理。

根据国外文献报道，20年内收集的蜂窝雷达罩维修记录表明，大约85%蜂窝雷达罩因为蜂窝进水原因需要维修，大多数航空公司证实波音737飞机蜂窝雷达罩的平均无故障维修使用时间少于2年。蜂窝夹层构



件的维护费用使得原本质轻的优点与泡沫夹芯结构相比不再存在，由于刚性泡沫夹芯是闭孔的，水和水汽不能进入夹芯内部，减少了维护检查的成本，所以泡沫夹芯结构的全寿命成本就更加经济，尽管达到相同承剪能力时泡沫的重量要比蜂窝稍重一些。同时，近年来随着降低制造成本的要求，RTM（树脂传递模塑）工艺技术的推广，需要有一种轻质闭孔材料来代替，而蜂窝结构不易满足RTM工艺的要求。

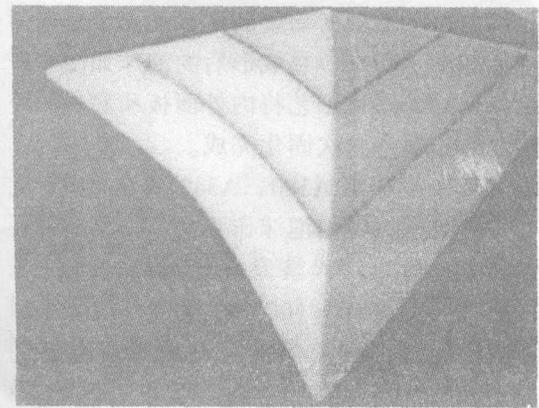
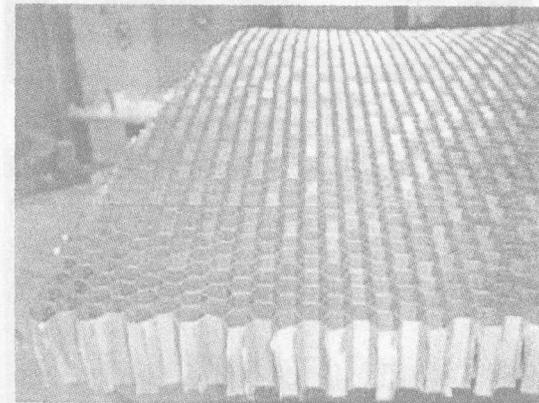
下面对几种芯材基本性能及其优缺点作一比较，见表1。

表1 几种芯材基本性能的比较

芯材种类	密度 (kg/m ³)	压缩模量 (MPa)	剪切强度 (MPa)
铝蜂窝	72	1034	2.3(L), 1.5(W)
NOMEX ^R 蜂窝	80	250	2.25(L), 1.2(W)
PMI ROHACELL ^R 泡沫 71WF 75		105	1.3
PVC 泡沫	80	54	1.1

铝蜂窝:铝蜂窝夹层结构一般应用在承受剪切载荷较大的部位，其面板通常也是金属板材，因为铝蜂窝和碳纤维面板一同使用时，如果两种材料之间电绝缘处理不当，就会发生电化腐蚀。

NOMEX^R 蜂窝:NOMEX^R 蜂窝是采用芳纶纸浸润酚醛树脂制成，NOMEX^R 蜂窝和铝蜂窝相比，局部失稳的问题要小得多，因为



NOMEX^R 蜂窝的蜂窝壁可以做得相对要厚一些。另外,因为 NOMEX^R 材料导电,不存在接触电化腐蚀的问题。NOMEX^R 蜂窝还能够满足 FST(烟雾毒性)要求。

PMI 泡沫 PMI (Polymethacrylimide, 聚甲基丙烯酸亚胺) 泡沫在进行适当的高温处理后,也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 泡沫具有很好的压缩蠕变性能,可以在 120℃ - 180℃ 温度、0.3 - 0.5Mpa 的压力下热压罐固化。PMI 泡沫能满足通常的预浸料固化工艺的蠕变性能要求。作为航空材料的 PMI 泡沫是一种均匀的刚性闭孔泡沫,孔隙大小基本一致。PMI 泡沫也能满足 FST 要求。泡沫夹层结构与 NOMEX^R 蜂窝夹层结构比较的另一个特点是其抗吸湿性好得多,由于泡沫是闭孔的,湿气和水分很难进入到夹芯里面去。两种材料的吸湿实验对比见图 4。

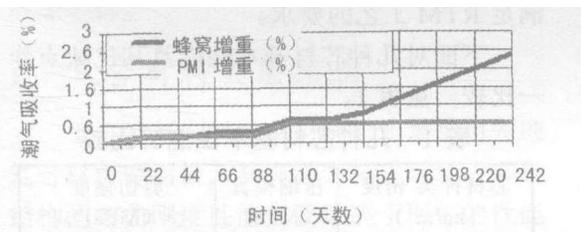


图 4 PMI 泡沫和蜂窝吸湿实验对比曲线

PVC 泡沫:PVC 泡沫的主要优点是价格相对便宜,通常用来制造小型飞机构件,制造工艺不需要热压罐,固化温度低于 120℃。在使用 RTM 工艺的时,需要对 PVC 泡沫加热后释放的气体给予一定的重视,因为这会导致面板材料内部产生孔隙。

3 泡沫夹层结构在民机上的应用

MD-11 飞机在设计过程中,通过市场调查表明蜂窝夹层结构显然不受欢迎,薄的夹层结构的表面容易损伤,产生纤维裂纹后水份会浸入蜂窝。蜂窝内有水份使操纵面失

去平衡,如果结冰,还会使蜂窝和蒙皮之间的胶层涨裂。薄壁蜂窝结构也不能用螺栓连接方法迅速修理。DC-10 飞机襟翼的蜂窝夹层结构子翼的缺点是吸湿,制造费用和维修成本很高。英国韦斯特兰公司为 MD-11 制造了一种新的子翼是把碳/环氧蒙皮粘结在碳/环氧肋和 PMI 泡沫芯材上,采用模压工艺制造,固化温度是 125℃,固化时间 2 小时。同时,MD-11 的发动机短舱也使用 PMI 泡沫芯材提高结构稳定性,使用热压罐固化,所采用的固化条件是温度 175℃。压力 0.3MPa,固化时间 2h,如图 5 所示。

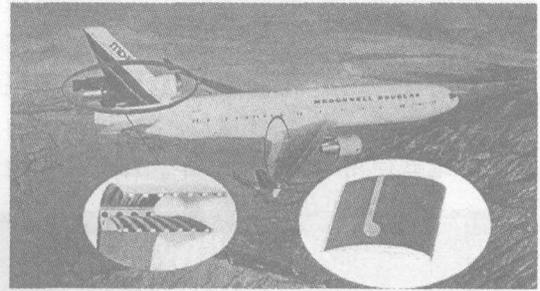


图 5 MD-11 发动机短舱和襟翼子翼

空客公司的 A 340-500/600 和 A 380 也较多采用了复合材料泡沫夹层结构,例如机身的后压力框,如图 6 所示。该后压力框的夹芯采用 PMI 泡沫制作的 A 型加强筋条提高了稳定性,其面板是碳纤维/环氧树脂,采用热压罐固化,固化条件是温度 175℃,压力 0.35MPa,时间 2h。先将泡沫用机械加工的方法加工出所需要的形状,热成形前的泡沫如图 7 所示;热成形后的泡沫如图 8 所示;采用共固化工艺将内外面板和芯材的胶接在热压罐中一次固化完成。

从今年开始 A380、A340 和 A330 飞机的副翼也开始使用泡沫作为夹芯材料,进入批量生产阶段后代替原先使用的 NOMEX^R 蜂窝夹芯。A340-500/600 复合材料副翼由三角形的翼盒和上下两块泡沫夹层壁板组成,如图 9 所示。采用热压罐共固化工艺,

固化条件是温度 175℃，压力 0.35MPa，时间 2h。

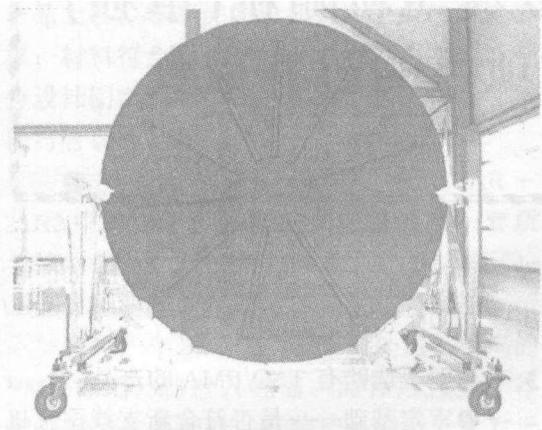


图 6 A 380 飞机后压力框

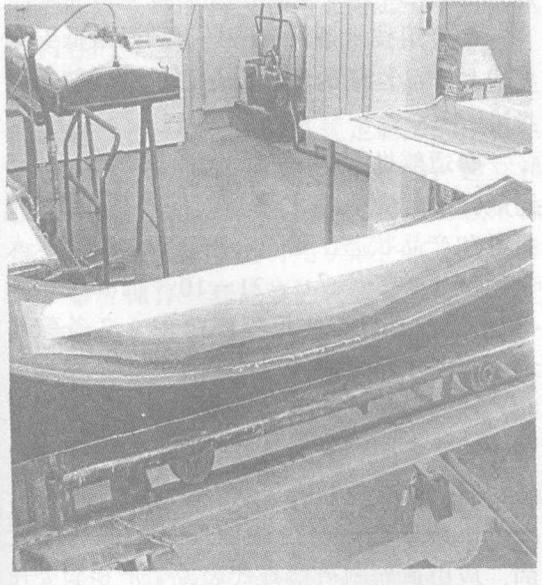


图 7 热成形前的泡沫

的维修成本，它已被多家飞机制造商应用在各种型号的民用客机上，如整流罩、雷达罩、天线罩、舱门、调整片、副翼、襟翼的子翼及机身后压力框等结构。泡沫和泡沫夹层结构对我们来说还是一种新材料和新结构，在设计应用的过程中应该进行仔细地权衡并进行适当的研究试验。我们相信在未来国产的民机中也会应用这种新型的复合材料泡沫夹层结构。

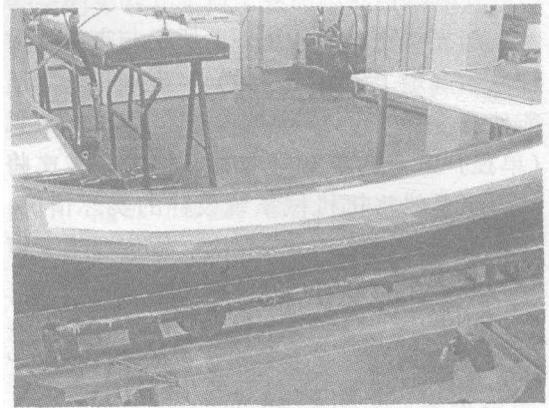


图 8 热成形后的泡沫

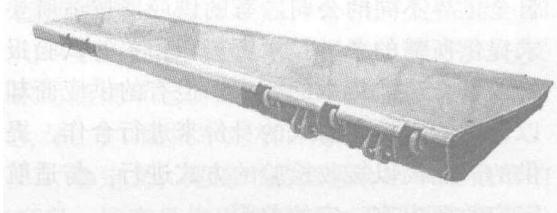


图 9 A 340-500/600 飞机副翼

小结

在复合材料夹层结构设计中使用泡沫芯不仅可以降低制造成本，而且也可以降低航空公司的维修成本。在设计时应该进行综合比较泡沫芯夹层结构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，泡沫芯夹层结构具有良好的抗吸湿性能和较低

参考文献

- [1] 飞机复合材料结构设计与制造，牛春匀
- [2] Commercial Aircraft Nose Radomes Using Rigid Foam Core Sandwich Construction, K. R. Braziel and C. L. Cartwright, Sandwich Constructions 2
- [3] FOAM CORES IN RTM STRUCTURES: MANUFACTURING AID OR HIGH - PERFORMANCE SANDWICH? By L. Herbeck, Markus Kleineberg, C. Schopinger, SAMPE 2002