

# 论文



## 复合材料垂直安定面 整体化加筋壁板设计

闫国良 刘兴宇 张洁

(一航一飞院)

### 引言

先进复合材料(advanced composites)是适应航空、航天、军工等高科技领域的需要而发展起来的一种高性能复合材料。目前,复合材料结构设计主要采用其良好的减重效果、耐疲劳以及抗腐蚀性能。用作受力结构件,它解决了单一材料无法解决的技术难关。目前已经广泛用于运输类飞机结构。复合材料本身的属性以及制造工艺使得复合材料结构趋向于整体化、多学科化。

复合材料材料设计和结构设计,材料成型和构件成型是同时一次完成,不可分开的。制得的产品既是复合材料,也是复合材料结构件。为了充分利用复合材料本身特点以及成型工艺的优势,复合材料件的整体化设计概念在民机上有了进一步的应用,对整体化设计的研究必要性也进一步凸显出来。

### 1 复合材料整体化壁板设计

整体化设计是将若干个零件设计成一个较大的整体件,包括实心层合板以及通过胶接形成的整体件,这些整体件可能通过共固化形成或由多个零件通过再次胶接形成。

整体化设计中,将实现纤维传力路线连续性的结构整体受力布局设计与充分利用复合材料固化成形工艺特点和工艺方法的有机结合是提高结构整体化程度的关键。计算机辅助设计与辅助制造(CAD/CAM)先进分析模拟技术,为整体化设计提供了技术支持,在成本/效益杠杆作用下,整体化设计的实施还

将受到模具工装复杂程度和成本、设备尺寸、容量和设备更新改造所需费用的成本考虑等限制。

先进复合材料的设计和制造必须从结构设计、材料、工艺和模具等方面综合考虑,并由这几方面的技术人员协调配合才能完成。

### 2 复合材料整体化加筋壁板的特点

- (1) 便于等强度设计;
- (2) 结构的总体和局部刚度好;
- (3) 减少了紧固件数量,减少了应力集中和钉孔对壁板截面积的削弱,同时减轻了连接件本身的重量;
- (4) 减少了组装的工作量;
- (5) 便于密封,减少了密封材料的用量;
- (6) 维护成本低;
- (7) 无液体侵入问题。

### 3 复合材料垂直安定面壁板设计

#### 3.1 设计思路和方法

垂直安定面按刚度要求设计,以保证全机的稳定性和足够的颤振裕度,并保证舵面操纵灵活与可靠,后掠效应增载和薄蒙皮设计,要求翼面壁板稳定性足够。

垂直安定面翼盒蒙皮主要受面内载荷,铺层由面内载荷决定,因此蒙皮以 $\pm 45^\circ$ 铺层为主。弯矩引起的轴向载荷由蒙皮、加筋条和梁缘条组成的壁板承受,因此筋条与缘条以 $0^\circ$ 铺层为主。由所受剪力确定腹板的

$\pm 45^\circ$ 层数,再由泊松比等其他要求确定 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 铺层数。

(1) 根据适当的设计方法,确定铺层比例以及层数;

(2) 给出初步铺层,用有限元分析程序进行应力分析,同时进行相应的试验;

(3) 再进行满足稳定性条件下的铺层优化设计;

(4) 刚度调参以满足刚度值要求和刚度变化趋势要求,以及颤振要求;

(5) 进行静强度校核。

本文采用等刚度设计方法,具体步骤见图 1:

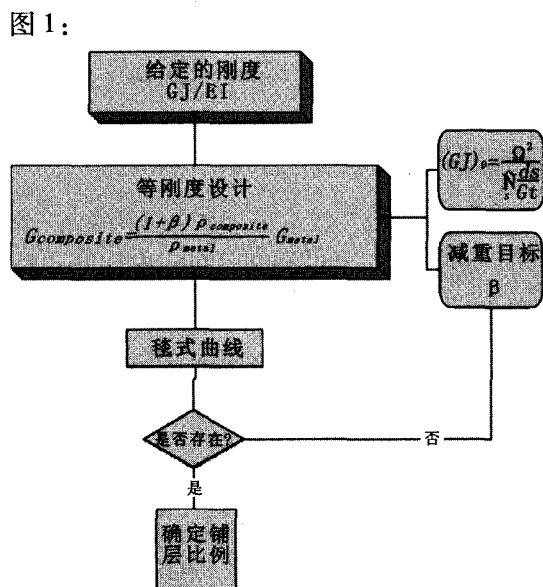


图 1 等刚度设计流程图

(1) 确定各设计剖面处的刚度要求指标  
根据气动弹性计算所得的刚度曲线或通过对金属结构各相应剖面的反计算求得各设计剖面处的弯曲刚度和扭转刚度的具体指标值。

(2) 选定各长桁和梁缘条的构造形式,并计算其能提供的刚度值

选取相应的长桁以及梁缘条的构造形式,分别计算其能提供截面惯性矩。根据减重要求确定不同形式截面的截面积,给定几

何尺寸然后获得其截面特性。

(3) 进行复合材料蒙皮、长桁的铺层设计

建立 $[0/\pm 45/90]$ 系列层合板的面内模量和铺层比例的关系曲线,根据所需要的减重以及刚度要求查到所需要的铺层比例。

(4) 对(2)、(3)进行整体化设计

考虑复合材料层压板设计的一般原则以及工艺的可实施性,对蒙皮和长桁初定的铺层进行整合。

(5) 检查所设计的蒙皮长桁的刚度是否满足指标要求

### 3.2 技术要点

铺层设计是复合材料性能可设计性的体现,设计技术要点如下:

(1) 按载荷主方向铺设纤维( $0^\circ$ 纤维对应正应力, $\pm 45^\circ$ 纤维对应剪应力,而 $90^\circ$ 纤维多用来调整泊松比),即纤维取向设计;

(2) 层合板特性,如强度、刚度、稳定性和损伤阻抗以及损伤容等均与层合板铺层顺序有关,且每一个性能与铺层顺序具有不同的关系。因此,铺层设计时,铺层顺序的确定应是一个兼顾各性能要求的折衷结果;

(3) 层合板铺层顺序应尽可能采取对称均衡铺层,以消除耦合效应,如果由于设计需要,如气动弹性剪裁需要,采用对称非均衡或非对称非均衡铺层时,应考虑减小工艺变形,尽可能将非对称和非均衡铺层靠近层合板中面;

(4) 层合板铺层设计一般有几个铺设角,且每一个铺设角所占铺层比例应不少于10%,以利刚度协调;

(5) 层组厚度(同一铺设角聚集在一起的层数)对单向带应不超过4层(即限制层组厚度)为宜。

### 3.3 典型整体化壁板设计

结构的整体化程度是与所采用的复合材料结构整体成形工艺技术密切相关的,目前

主要整体壁板类成型工艺有：

- 共固化、二次固化、二次胶接工艺；
- 预成型件/RTM(或 RFI)等液体成形工艺；
- 纤维缠绕工艺。

如图 2 所示,以加筋壁板为例,介绍两种形式整体化壁板帽形和工字形。每种形式的整体化壁板根据设计方法以及成型过程的不同,又自上而下列举了三种情况,这三种情况整体化的程度也是不同的。

帽形,图 2(a)：

(1) 长桁和蒙皮分别固化成型,然后两者通过胶膜二次胶接在一起;并且,每个长桁铺层组相互独立。此种设计,由于长桁铺层组与蒙皮铺层组独立设计,成型工艺与设计均较易。

(2) 长桁铺层组先固化,然后通过胶膜与预处理的蒙皮二次固化在一起;长桁铺层组以及蒙皮铺层组进行关联设计。

(3) 长桁铺层组与蒙皮铺层组以及中间的芯子(泡沫)整体固化成型,固化后,芯子不再取出;长桁铺层组以及蒙皮铺层组进行关联设计。此种设计具有较好的工艺性,并且无明显的铺层组界面。

工字形,图 2(b)：

(1) 长桁和蒙皮分别固化成型,然后两者通过胶膜二次胶接在一起;并且,每个长桁铺层组相互独立。此种设计,由于长桁铺层组与蒙皮铺层组独立设计,成型工艺与设计均较易。

(2) 长桁与蒙皮共固化在一起;长桁铺层组相互独立,并且与蒙皮铺层组也相互独立。

(3) 长桁与蒙皮共固化在一起;长桁铺层组以及蒙皮铺层组进行关联设计。此种设计具有较好的工艺性,并且无明显的铺层组界面。但由于长桁铺层组与蒙皮铺层组关联设计,为了保持铺层组的对称均衡,防止扭曲

变形,设计难度较大。

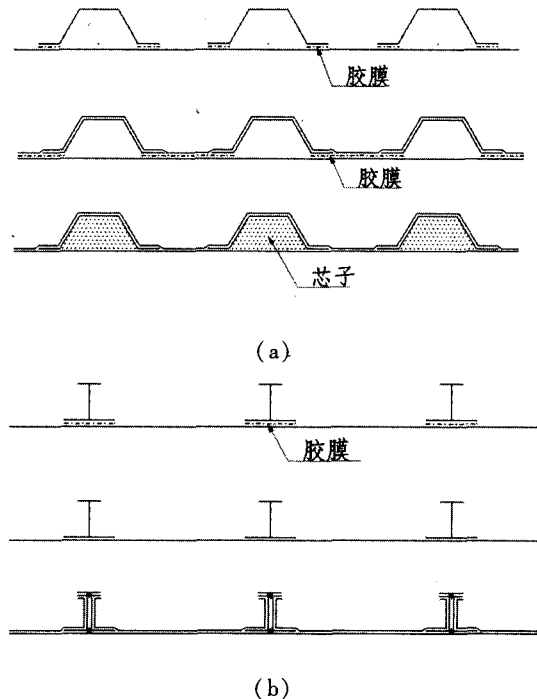
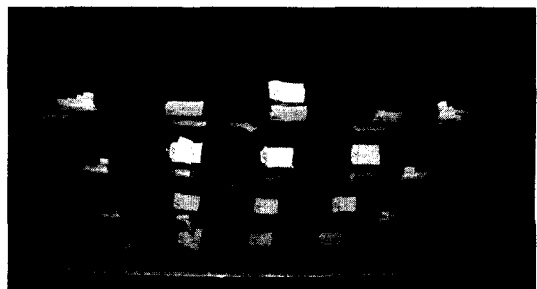


图 2 典型复合材料整体化加筋壁板

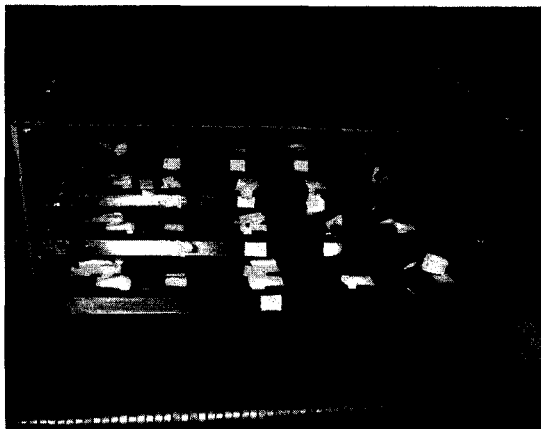
### 3.4 相关试验



J型壁板



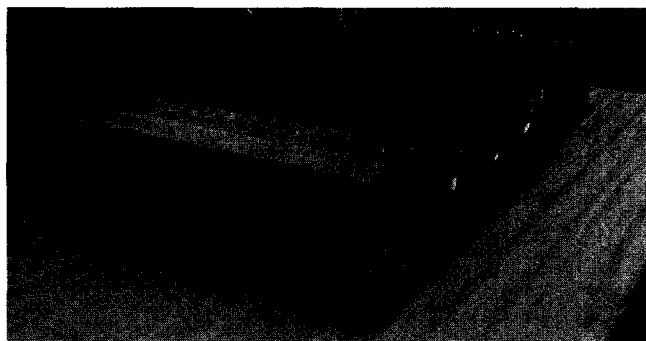
M型壁板



Y 型壁板



工字梁开口剪切



J 型截面选型盒段

图 3 相关试验

根据整体化加筋壁板的设计结果,主要进行了 2 种典型剖面(J、M)的壁板进行了稳定性(轴压、剪切)以及承载能力试验。试验件类型包括:壁板轴压、壁板剪切、开口梁剪切以及典型剖面盒段。相关试验图片见图 3。

### 3.5 结论

(1) 本文所研究的复合材料垂直安定面加筋壁板设计、工艺是可实现的;

(2) 运用本文方法设计的复合材料垂直安定面加筋壁板总体及局部刚度是满足要求的;

(3) 试验结果是理想的。

## 4 应用前景

随着航空运输业的竞争越来越激烈,提高结构的效率成为提高飞机竞争力的一个重要手段。复合材料的大量应用,尤其是复合材料整体化结构设计概念的出现,为飞机制造商以及飞机设计者提供了一种行之有效的设计理念。随着整体化设计概念的研究以及制造技术、制造工艺的进一步发展,复合材料整体化结构在未来民用飞机上的应用将会越来越多。

### 参考文献

- [1] 沈真. 复合材料设计手册[M]. 航空工业出版社, 2001.