

中央翼下壁板金属和复合材料设计方案对比

Comparison Between Metal and Composite Design of Lower Panel of Center Wing Box

中国商飞上海飞机设计研究院 袁新浩 葛建彪



袁新浩

硕士, 目前就职于中国商飞上海飞机设计研究院, 从事中央翼设计工作。

复材方案和金属方案在设计、制造、成本和周期等各方面都有很多差别, 本文结合民用飞机中央翼下壁板的设计过程, 在相同的设计依据和结构环境下, 从结构设计的角度对两者进行对比。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.14.090

造、成本和周期等各方面都有很多差别, 本文结合民用飞机中央翼下壁板的设计过程, 在相同的设计依据和结构环境下, 从结构设计的角度对两者进行对比。

设计依据

中央翼下壁板的设计依据主要有: 总体要求(包括理论外形和重量指标等)、适航条款、结构设计准则、材料选用规范、维修性可靠性、系统协调、安全性、设计载荷等。

结构环境

1 中央翼结构方案

民用飞机中央翼位于机身和机翼交汇处, 是中央油箱的一部分, 如图 1 所示。

展向梁式的中央翼一般由上壁板、下壁板、前梁、后梁、1 号展向梁、2 号展向梁和左右 1 号肋组成, 如图 2 所示。

2 中央翼下壁板主要载荷

下壁板由蒙皮和长桁组成, 作为中央翼结构的一部分参与中央翼结构的整体受力, 其承受的主要载荷如下。

(1) 外翼传来的弯矩: 在 2.5g 工况下, 下壁板受拉; -1g 工况下, 下壁板受压。主要通过自己的变形来平衡。

(2) 外翼传来的扭矩: 在下壁板表现为剪流, 一部分通过 1 号肋和前后梁传到机身框上; 另一部分传到龙骨梁。

(3) 此外还有应急着陆时的油

目前飞机上复合材料的应用比例已经成为衡量飞机先进性的重要标准。复合材料具有比强度高、比刚度大、成型工艺性好及刚度方向的可设计等性能。对于复合材料结构和金属结构在结构设计中的区别, 尤其在细节设计上的介绍, 较少见诸于各类学术期刊。

复材方案和金属方案在设计、制

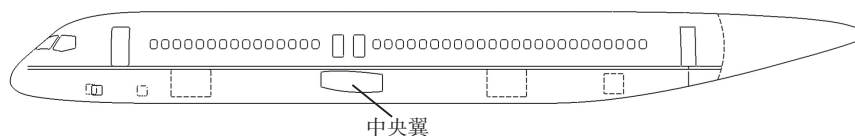


图1 中央翼位置示意图

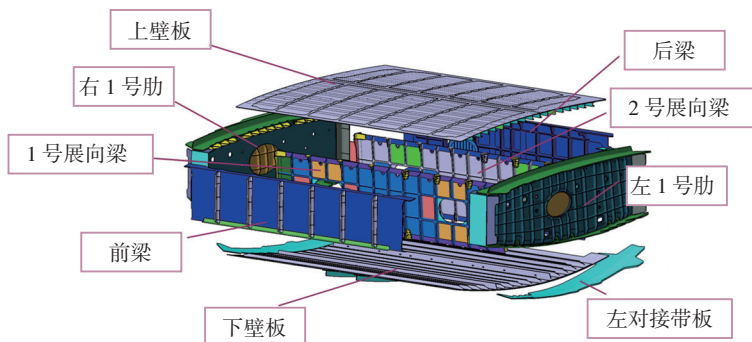


图2 中央翼结构示意图

压载荷、翼下系统设备的面外载荷等。

详细方案

1 复合材料下壁板方案

(1) 结构布置。

复合材料下壁板由1块蒙皮、15根长桁、12块连接带板、2根龙骨梁缘条组成。普通长桁为“工”形，和展向梁连接的长桁为“T”形，如图3所示。

(2) 结构选材。

蒙皮选用碳纤维预浸料，表面铺设玻璃布；长桁选用碳纤维预浸料；龙骨梁缘条选用7000系列O态铝合金。

(3) 设计参数。

复合材料壁板具体的铺层设计除满足一般的铺层设计要求外，还要考虑长桁和蒙皮的受力特点；表面防护、剔层设计、翘曲等；最终长桁和蒙皮采用对称均衡铺层。

2 金属材料下壁板方案

(1) 结构布置。

金属材料下壁板由2块蒙皮、15根长桁、2根龙骨梁缘条组成。蒙皮分为2块，普通长桁为“工”形，和展向梁连接的长桁为“T”形。金属下壁板结构如图4所示。

(2) 结构选材。

蒙皮和长桁选用2000系列铝合金；龙骨梁缘条选用7000系列O态铝合金。

(3) 设计参数。

蒙皮分为基本厚度区和厚度加强区，厚度变化体现在基本厚度区，从前梁到后梁均匀变化，加强区统一加厚一定厚度。

方案对比

1 设计准则

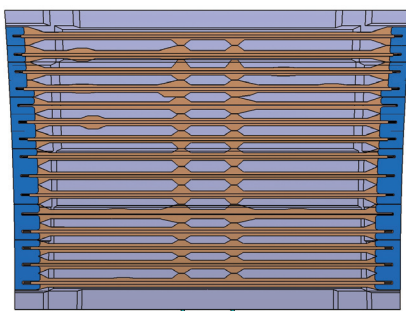


图3 复合材料下壁板结构示意图

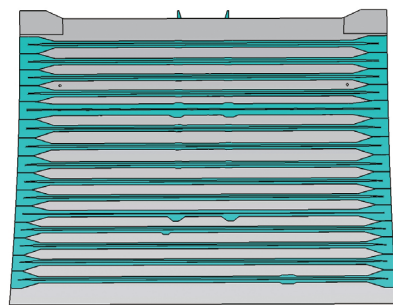


图4 金属材料下壁板结构示意图

(1) 金属方案设计准则。

金属方案中央翼下壁板设计准则主要是静强度和疲劳。主要破坏形式：蒙皮长桁组合剖面拉伸破坏、蒙皮失稳、钉孔挤压破坏及钉剪切破坏等。

(2) 复材方案设计准则。

复材方案中央翼下壁板设计准则主要是复合应变控制和静强度。复合应变裕度：

$$M.S = \left(\left(\frac{\varepsilon_x}{[\varepsilon]} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_y}{[\varepsilon]} \right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{[\gamma]} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} - 1$$

其中， ε_x 、 ε_y 分别为 x 、 y 方向的拉伸应变， $[\varepsilon]$ 为许用拉伸应变， γ_{xy} 为 xy 平面的剪切应变， $[\gamma]$ 为许用剪切应变。主要破坏形式：复合应变失效、长桁拉伸破坏、长桁失稳、钉孔挤压破坏及钉剪切破坏等。

2 载荷分布特点

金属方案和复材方案的结构传力路线相同，下壁板载荷的分布趋势一致。图5是复材方案2.5g工况的VON MISES应力分布图，应力最大的位置为后梁连接区、2号展向梁与蒙皮连接区。

两种方案的不同点：

(1) 金属方案中蒙皮分块，对接长桁除了承受拉压载荷外，还要传

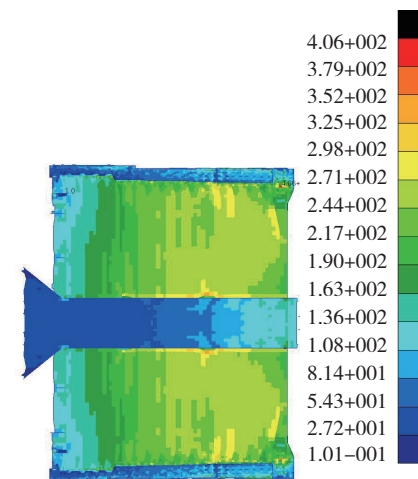


图5 2.5g工况的VON MISES应力分布

递蒙皮的航向剪流;

(2) 由于复合材料油箱的防渗漏要求——油箱界面厚度不能低于4mm,所以蒙皮在1号展向梁和前梁之间应力较小,裕度较大。

3 工艺性

3.1 成型方法不同

(1) 复材方案: 干长桁/湿蒙皮共胶接成型。

(2) 金属方案: 蒙皮喷丸成形,长桁型材机加成形,长桁和蒙皮通过紧固件连接。

3.2 蒙皮的加强区域不同

(1) 复材方案加厚区在内表面和外表面为光滑曲面。原因为干长桁/湿蒙皮共胶接成型方式,要求蒙皮外表面为铺贴面。将加厚区布置在内表面,保证蒙皮的外表面光顺,可以使模具更简单,进而提高铺贴工艺性,提高铺贴质量。

(2) 金属方案内表面为光滑曲面,外表面为机加面。原因为蒙皮内表面是和长桁连接的贴合面,保证内表面的光顺,有利于简化长桁的形状,减小长桁和蒙皮的连接间隙,减小强迫装配应力。

3.3 龙骨梁连接区加强方式不同

(1) 复材方案中,龙骨梁连接区蒙皮不加厚。因长桁和蒙皮共胶接,可视为整体共同承担连接载荷,在连

接区长桁局部加宽,形成加厚区,如图6所示。

(2) 金属方案中,龙骨梁连接区蒙皮在外表面局部加厚,如图7所示。

3.4 1号肋连接区设计不同

(1) 蒙皮在1号肋连接区加厚的方向和原因不同。金属方案中加厚在外表面,主要是降低应力水平,提高连接区疲劳寿命;而复材方案中加厚在内表面,主要是考虑混杂结构连接时的热应力。

(2) 复合材料方案中增加了连接带板。外翼下壁板为金属材料,中央翼下壁板为复合材料,外翼和中央翼的下壁板从前梁到后梁厚度不同,变化梯度也不同,如不加连接带板,1号肋下缘条的形状会比较复杂,工艺性差。通过调节连接带板厚度,可调节中央翼一侧的厚度变化趋势,改善1号肋下缘条的工艺性。同时连接带板作为牺牲层,可以起到调节装配间隙的作用,还可以对长桁端头的填缝密封起辅助作用。

4 数据的建模思路

零件的建模必须考虑成型工艺。金属零件的建模不用考虑零件的内部情况,但复材零件建模则需要考虑零件内部铺层情况,特别是厚度过渡区。

复材零件在成型后一般只对轮廓进行机加,或者开孔,除牺牲层外厚度方向不进行机加。以常见的斜削特征为例,要获得图8所示带斜削特征的一个零件,金属零件只要按照图9所示将长方体毛料的红色部分机加掉即可。但如果复材零件也使用同样方法则会导致斜削区铺层断裂,容易出现表面分层,机加后的内部铺层如图10所示。正确的做法是直接铺出带斜削特征的零件,正确的铺层之一如图11所示。

金属蒙皮的建模方法: 根据蒙皮的受力特点将蒙皮的实体分为基本厚度区和连接加厚区。采用布尔

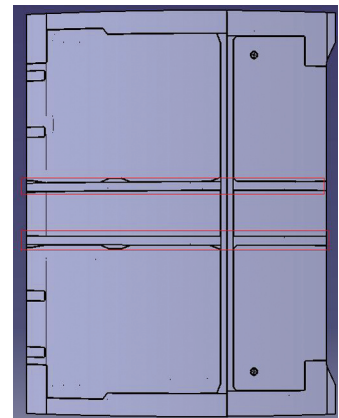


图7 蒙皮在龙骨梁连接区局部加厚

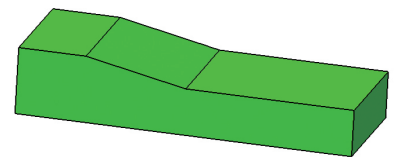


图8 带斜削特征的目标零件

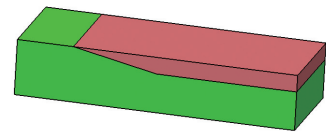


图9 金属零件机加方法

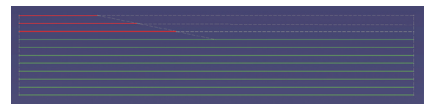


图10 复材零件机加后内部铺层

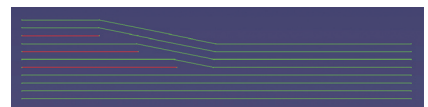


图11 正确的复材零件内部铺层

运算生成最终的实体; 通过倒斜角、倒圆角等方法进行过渡。

复材蒙皮的建模方法如图12和图13所示的下壁板蒙皮,厚度区域分布复杂,不同厚度区之间的过渡区更加复杂,用金属蒙皮的方法建模非常困难。一个比较好的方法是使用铺贴面沿着法向生成一个比较厚的实体,然后用FIBERSIM软件生成蒙皮的内形面(本质上是各个单层实体堆积叠加形成的实体表面)来切割,得到最终的实体。

5 结构连接和紧固件应用

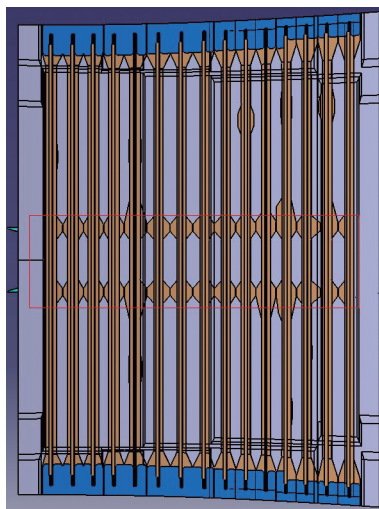


图6 长桁在龙骨梁连接区局部加宽

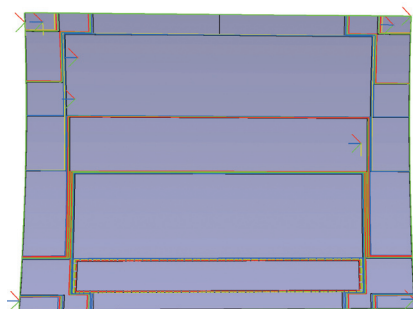


图12 下壁板蒙皮铺层情况

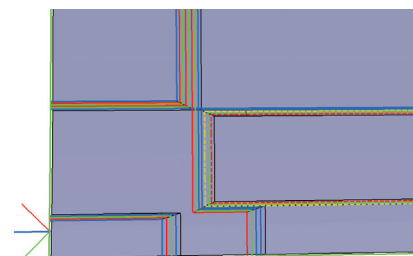


图13 下壁板蒙皮厚度过渡区细节

(1) 异电位材料连接时防止电化腐蚀的方法不同。金属结构主要措施是对金属零件进行氧化等表面处理,而复材结构则通常采用隔离措施,在复合材料零件表面铺设一层绝缘的玻璃布。

(2) 紧固件选用、制孔方法、安装方法均不同。

6 系统支架的安装

复材方案: 复材结构对面外载荷更敏感,面外载荷容易导致结构内部分层;开孔的应力集中更明显,但复材的工艺性又导致了结构局部加强更困难。所以复材方案中系统接头主要安装在长桁和蒙皮连接处,和蒙皮、长桁共钉。系统接头、长桁、蒙皮的位置关系如图14所示。

金属方案: 金属结构中接头一般也安装在长桁和蒙皮连接处,和蒙皮、长桁共钉。仅连接蒙皮的接头位置,蒙皮上紧固件孔需要进行开锋衬套冷挤压加强。系统接头、长桁、蒙皮的位置关系如图15所示,红色框中的紧固件孔为需要冷挤压加强的紧固件孔。

7 重量

7.1 重量概况

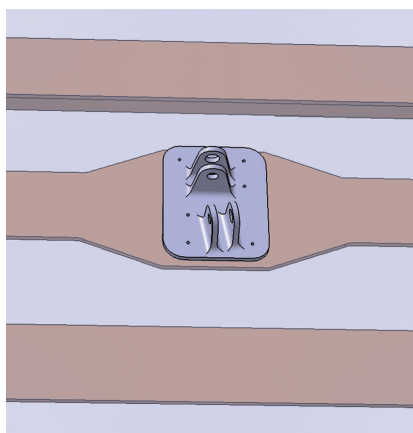


图14 复材方案接头、长桁、蒙皮的位置关系图

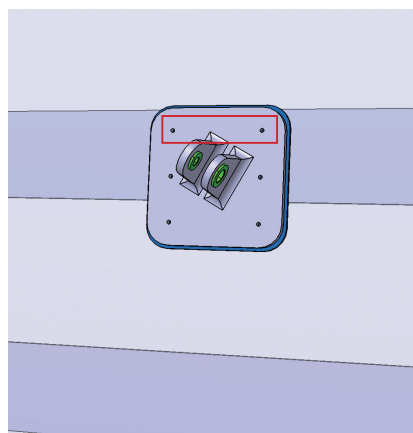


图15 金属材料结构接头和长桁、蒙皮的位置关系图

表1 复合材料方案和金属方案重量对比

项目	总重量	蒙皮	长桁	龙骨梁缘条	连接模块
减重比例	20	19.5	30.3	-2.7	36.8

%

表2 金属方案和复材方案对比

方案	相同点	不同点	优缺点
金属方案	传力路线,载荷分布趋势	设计准则、工艺方法、建模思路、结构连接和紧固件应用、支架安装方法	重量重、受环境影响小、适航取证相对容易
复材方案			重量轻、受环境影响大、适航取证相对困难

复材方案和金属方案的重量对比概况如表1所示。

7.2 重量分析

(1) 长桁的减重比例明显高于蒙皮。复合材料长桁之所以减重比例高,是因为长桁的铺层限制条件少,铺层中 0° 比例很高,充分发挥了CFRP比弹性模量高的优势。

(2) 复材方案中龙骨梁缘条的重量比金属方案的重。复材结构连接时,主要是因为紧固件边距和间距比金属结构大。

8 环境影响

温度、湿度、闪电等自然环境对复合材料结构和金属结构的影响不同。复合材料结构使用温度限制严格,力学性能受湿度影响大,需在材料许用值里进行考虑。复材结构是不良导体,不能作为导电通路,闪电防护相对困难。

9 适航

与金属方案相比,复材方案要满足FAA咨询通报AC20-107B:

(1) 复材方案在工艺控制、闪电防护、燃油防火等方面的要求比金属方案严格很多;

(2) 复材结构需要进行积木式试验,技术复杂,耗时漫长。

10 讨论

通过以上的分析,将两个方案的对比结论归纳如表2所示。

结束语

复合方案和金属方案相比,具有重量轻、可设计性强等优势,更多的采用复材方案是未来飞机设计发展的趋势;但目前面临着材料稳定性、胶结质量、零件成型精度、无损检测技术、热应力分析、维修维护、生产成本和进度风险等一系列挑战,还需要进一步的技术攻关。

(责编 玲犀)