

两种民用飞机翼身对接结构比较分析

汤平

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

[摘要] A350 和波音 787 是当今最先进的民机代表, 机体结构的复合材料含量高, 形成大量的金属与复合材料的混合结构, 如翼身对接结构。研究两种机型的翼身对接结构有现实的借鉴意义。阐述了民用飞机翼身对接工艺界面通常的选取范围, 图解了两种机型对接工艺界面各自的特点; 列举了两种机型机翼壁板对接、机翼梁对接和外翼上壁板中机身对接的结构并加以分析, 比较了两种对接结构的优缺点; 说明了两种对接结构对翼身装配和总装的影响; 对混合结构连接的国内研究状况和设计思路做了阐述。最后总结了两种机型对接结构的特点。

关键词: 对接结构; 下壁板; 上壁板; 长桁端头; 开槽

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.13.028



汤平

高级工程师, 研究方向为民用飞机翼身对接结构, 包括机翼上、下壁板对接, 前、后梁对接, 翼上框对接, 对接肋结构等。

翼身对接结构是飞机外翼载荷传递转换到机身的关键部位, 此处载荷大, 协调复杂^[1]。当前先进民用客机 A350 和波音 787 的翼身对接结构有各自的设计特点, 这是和设计风

格传承、总体布置、工艺水平密切相关的。这两种飞机的外翼、中央翼和机身大量使用了复合材料, 因此在对接结构的具体考虑上也有相似的地方。本文分析了这两种机型的翼身对接界面和对接结构, 阐述了各自对接界面的特点和对接结构的设计原理及优缺点。

翼身对接界面

1 翼身对接界面的选取

民用客机通常是下单翼布置, 翼身对接有工艺界面^[2]。此对接界面的选择范围见图 1。图 1 中 A 向视图是飞机投影在水平面上的俯视图。直线 AB 是外翼前梁平面和外翼上翼面的交线, 直线 CD 是外翼后梁平面和外翼上翼面的交线, 弧线 BD 是外翼上翼面和中机身外形面的交线, MN 是机身最宽处边线。 E 、 F 分别是 MN 与 AB 、 MN 与 CD 的交点。通常民用飞机翼身的对接界面定义范围就是图 1 (a) 中四边形 $EFDB$ 。

P 是线段 EB 上的点, Q 是线段 FD 上的点, 连接 P 、 Q 成线段 PQ , 线段 PQ 即对接界面的定义线。过 PQ 作面即可定义为对接界面。对接界面通常垂直水平面, 或根据总体布置和对接结构的需要调整一个很小的角度。 P 、 Q 点位置的不同会影响对接结构前梁三角区和后梁三角区的大小。通常线段 PQ 会平行机身对称面或微调一个很小的角度。 PQ 位置的变化对应着对接肋平面和中央翼外形的变化, 见图 1 中 $H-H$ 视图。

配合面是对接肋上缘条的上立板与机身蒙皮之间相贴合的面; 图 1 中配合面是蒙皮的内侧, 则过渡面是配合面加蒙皮厚度后与机身外形面之间过渡曲面, 见图 1 中 $H-H$ 视图。

对接界面超过 EF 将造成超大的对接过渡面, 很大的前梁三角区和后梁三角区, 影响外翼气动面积, 并使得整流罩增大和难以布置; 对接界面超过 BD 将使得过渡面与机身

外形面曲率方向相反,造成结构复杂,传力不合理;如以机身外形面作为配合面和过渡面,则对接肋上缘条的上立板(机身外形面)和下立板(肋平面)会形成错位,不利于相应结构的布置,也会造成传力不合理、重量损失。

波音和空客两大系列民用飞机在翼身对接的对接界面定义上有着各自典型的特点,界面的选择和总体布置、工艺水平是密切相关的。

2 波音787的翼身对接界面

波音787的对接界面选在机身外形最宽处(图1中线段EF处)作机身外形的垂直切面,其优点是中机身侧壁板传力较直接^[2],相关零件的制造难度减小;其不足之处是前后梁三角区较大,整流罩偏大,见图2。

波音787的对接肋平面(对接界面)、配合面、过渡面是同一平面,简单直接,空间示意图2(b)。

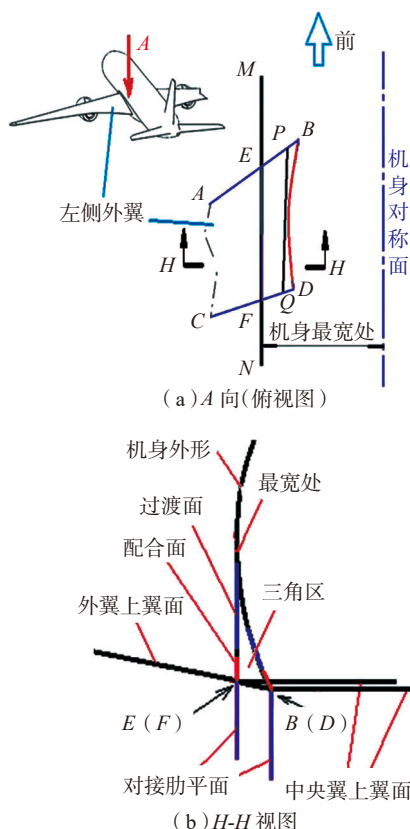


图1 翼身对接界面选择范围

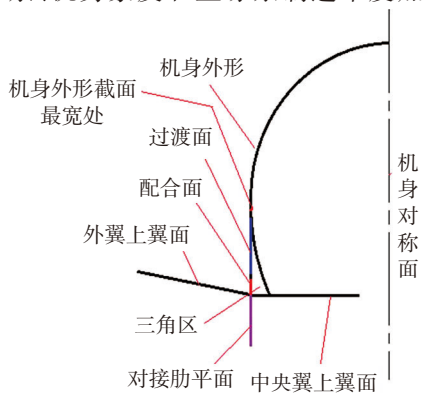
Fig.1 Selection range of joint interface

由图2(b)中可见过渡面(深蓝色)、配合面(红色)、机身外形面围成的区域为三角区,即由于对接结构的需要而突出机身等直外形的翼上部分。此种对接界面造成三角区较大,蒙皮从配合面到机身等直段过渡困难,因此蒙皮在中央翼前梁处分块,配合面、过渡面的部分向后延伸到起落架舱后端框,蒙皮再分块。蒙皮分块会影响机身分段和装配的次序。

3 A350的翼身对接界面

A350的对接界面选在外翼上翼面和机身外形交线(图1中曲线段BD)的位置,交线在对接肋平面内侧,但距离很近,见图3(a)。

其优点是机身蒙皮从外部贴合上对接肋上缘条的上立板,装配路径开敞,三角区较小。其不足是配合面是曲面,且曲面是前后达5m的长条形;机身外形面是贴模面,因此蒙皮厚度公差和内侧面轮廓度公差都会对装配造成困难^[3],使得装配加垫复杂、机身蒙皮和上缘条制造难度加



(a) 平面示意

(b) 空间示意

图2 波音787的翼身对接界面

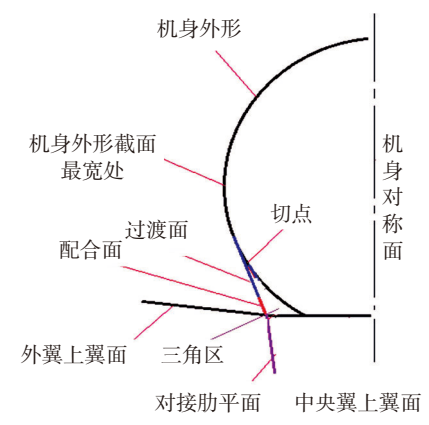
Fig.2 Wing/body joint interface of Boeing 787

大。对接肋平面和配合面之间有一定的角度,此角度会影响梯形板和机身侧壁的传力,须布置过渡结构。

上缘条上立板与机身蒙皮的配合面与过渡面为同一个曲面,是一组切线构成的直纹面;对接肋平面(对接界面)与此直纹面在外翼上翼面上共线。空间示意图3(b)。

图3(b)中直纹面是鞍形,其一部分作为过渡面(深蓝色),一部分作为配合面(红色),紫色部分为对接肋的平面。

A350对接肋平面不垂直于地面,有一个倾斜角度,使得中央翼下壁板的展向宽度小于上壁板。由于三角区很小,在中央翼前梁处,中机身蒙皮跨越前梁三角区过渡到中机身等直段,再在机身框处分块;向后,中机身蒙皮跨越后梁三角区,在起落架舱位置过渡到机身外形,延伸到舱后端框再分块。



(a) 平面示意

(b) 空间示意

图3 A350翼身对接界面

Fig.3 Wing/body joint interface of A350

翼身对接结构

1 波音787的翼身对接结构

与波音系列飞机 737/747/767 的翼身对接结构很类似,波音 787 飞机对接结构的特点是对接界面处的前/后梁三叉接头带上下翻边,和机翼的 C 形梁配合,称之为套合式。

波音 787 翼身对接区结构的材料:机翼壁板(蒙皮、长桁)是复合材料;三叉接头、上/下缘条是钛合金。钛合金的优点是和复合材料在热膨胀和电位上相容性好,但钛合金切削黏刀严重、发热量大、残余应力消除困难^[4]、制造精度控制困难、热处理复杂、综合工艺难度大。

1.1 上/下壁板对接

波音 787 的对接肋上缘条分为上、下两部分,都是“T”形,组合成“十”形;下缘条为“土”形。机翼上下壁板的长桁都是“工”形,见图 4。

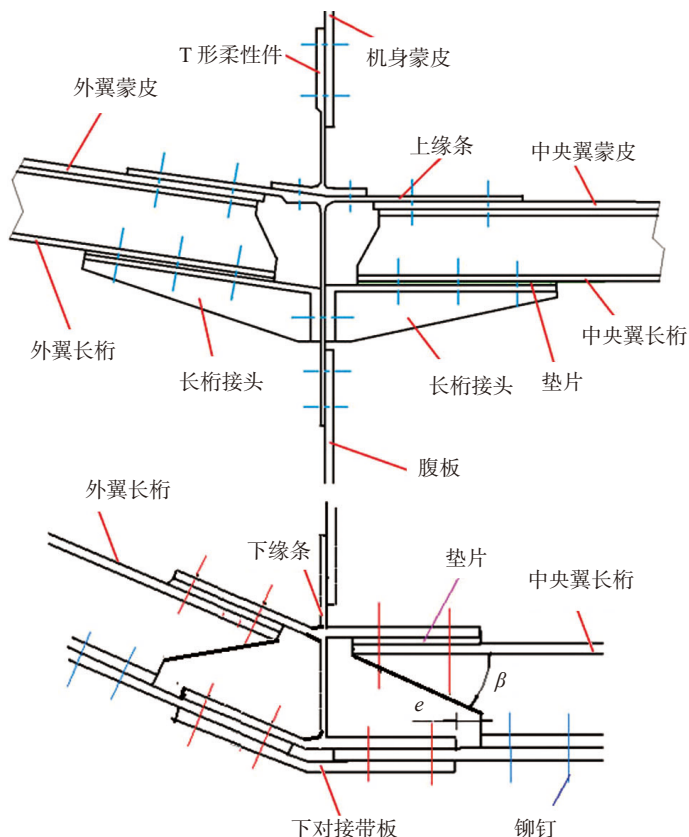


图4 波音787机翼上/下壁板对接

Fig.4 Upper/dower panel joint of Boeing 787

上/下缘条作为传力的主要部件,受载大,外翼弯矩造成的上壁板压力、下壁板拉力,外翼扭矩造成的剪力,都要通过上/下缘条来传递,外翼的升力也有部分通过上缘条传递。上/下缘条的尺寸也大,航向有 5m 以上。为降低钛合金上/下缘条的制造难度和避免重量损失,波音 787 的上/下缘条展向尺寸得到控制,只有两排钉。

钛合金的强度高,在连接结构的夹层中,通常钛合金厚度最小。但受限于零件加工刚度的要求,对上缘条这样在外翼中央翼两侧类似薄板的结构,无法完全按强度计算设计厚度,须从外侧至根部逐渐加厚,以同时满足强度要求和加工刚度要求。

图 4 中,与中机身蒙皮连接的上缘条上部是“T”形柔性件,与翼上框框端连接的结构也是柔性件,见图 5。

“T”形柔性件在外翼载荷(主要是上壁板压力)传来时会产生向机身外侧偏转的趋势;此时翼上框的内侧缘条受拉,该拉力因柔性连接结构的变形而释放,即释放了框端的弯矩。翼上框腹板上的剪力通过柔性连接结构传到上缘条。

上壁板长桁端头有斜削,可以改善应力分布^[5];因端头受压会产生附加弯矩,具体的斜削角度和方向都会影响结构的稳定性和应力集中^[6]。下壁板长桁的端头切割,长桁上部缘条和下缘条搭接。下对接带板和下缘条夹住蒙皮形成双剪连接。为防止长桁端头和蒙皮贴合的缘条脱胶开裂或分层^[7],打有 4 颗铆钉,见图 4。

1.2 前/后梁对接

波音 787 飞机梁对接采用梁和三叉接头套合的方式;三叉接头有上/下翻边,与 1 号肋上/下缘条对夹住梁的上/下缘条,形成典型的双剪结构传递载荷,梁的上/下缘条传递较大的载荷。三叉接头腹板和梁腹板搭接,见图 6。

波音 787 飞机梁对接结构紧凑,传力直接,但套合式的对接方式会增加装配时调整和加垫的难度。

1.3 斜撑板连接

波音 787 飞机的中机身没有后梁框,外翼后梁传来的升力载荷主要通过斜撑板传递到起落架舱上的机身框,见图 7。斜撑板与机翼后梁对接接头通过“T”形件连接,见图 6 中 B-B 视图。

2 A350翼身对接结构

A350 的翼身对接结构和空客系

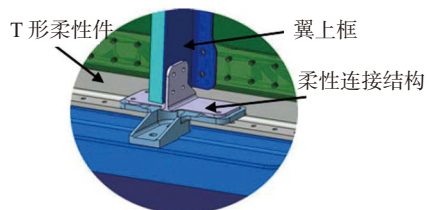


图5 波音787翼上框端连接结构

Fig.5 Joint structure of Boeing 787 over wing frame

列飞机 A320/A330/A380 的类似,是对接界面处的对接肋两端的前/后三叉接头不带上/下翻边,与机翼的梁通过角盒连接,称之为角盒式。

A350 飞机翼身对接区结构的材料:机翼壁板(蒙皮、长桁)是复合材料;三叉接头、上/下缘条是铝锂合金。铝锂合金的优点是制造工艺相对钛合金简单,使用在对接结构上材料利用率高、疲劳性能较好;其缺点是与复合材料在热膨胀和电位上相容性较差,设计时需要考虑温度载荷和异电位腐蚀防护^[3]。

2.1 上/下壁板对接

A350 的对接肋上缘条为“十”形整体结构;下缘条为“⊥”形。机翼上下壁板的长桁都是“⊥”形,见图 8。

上缘条为整体式,长桁端头斜削,角盒式长桁接头对顶连接,长桁接头只连接长桁的缘条,不连接长桁腹板;上壁板端头的承载特性和整个上壁板的受压稳定性是考虑的重点^[8];展向 4 排钉,上缘条展向宽度

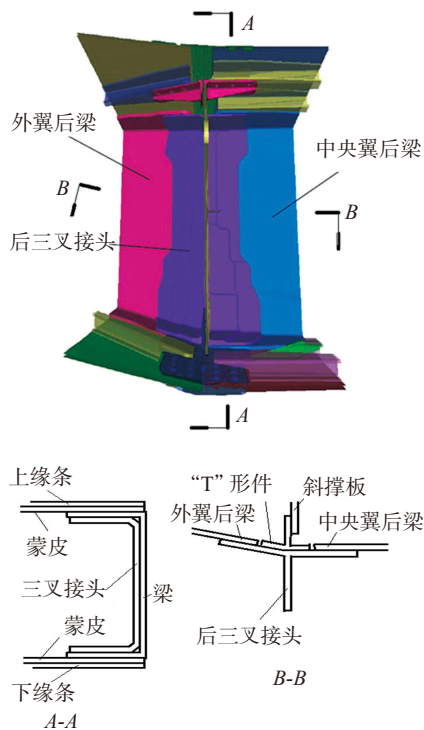


图6 波音787梁对接(套合式)
Fig.6 Spar joint of Boeing 787

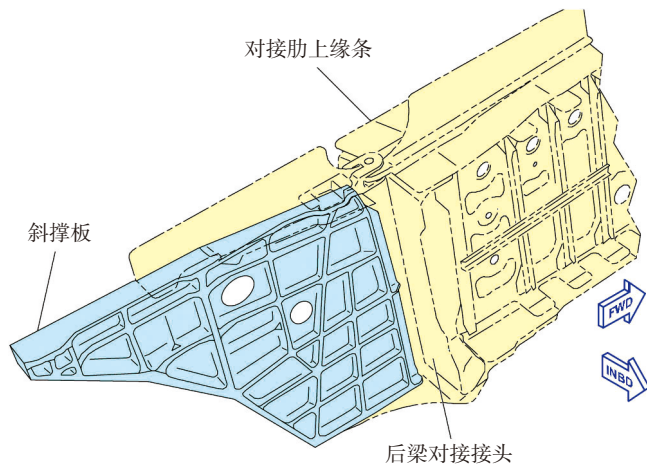


图7 波音787斜撑板连接
Fig.7 Boeing 787 trap panel

较大。

下缘条开槽,长桁端头腹板切除部分并斜削,插入下缘条的槽中,开槽深度和斜削的角度都和传力特性密切相关^[9]。外侧有对接带板对夹,形成典型双剪,有利于拉伸载荷区的疲劳性能^[10]。下缘条展向宽度也较大。因为下壁板长桁间距的限制了排钉,长桁端头不对称,见图 8 中 A 向视图。

上缘条上立板没有特意做成独立柔性件;与翼上框的框端头连接的是框下接头,框下接头和框端头夹住中央翼上壁板和上缘条侧边形成对顶连接,见图 9。

相对波音 787 的柔性连接, A350 翼上框端头是刚性连接。框内侧缘条的拉力传递到框下接头,框腹板上的剪力直接传递到上缘条。

2.2 前/后梁对接

A350 飞机梁对接和波音 787 明显不同,见图 10。其三叉接头没有上/下翻边;梁缘条采用角盒接头对顶在 1 号肋腹板上连接;外翼/中央翼的梁缘条端头切去一段,由角盒和蒙皮贴合,角盒的长度增加,可使得梁缘条的载荷逐次传递到角盒上,避免了对接区夹层厚度过大。

梁腹板对接在中央翼一侧是搭接,这是因为中央翼是散件组装,搭接并不增加装配难度,又避免增加重

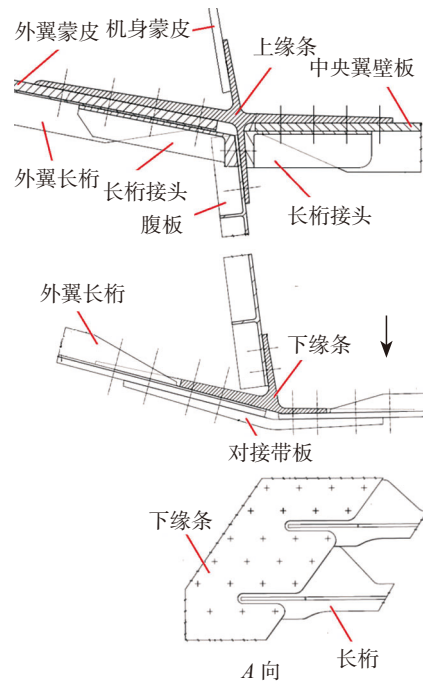


图8 A350机翼上/下壁板对接
Fig.8 Upper/dower panel joint of A350

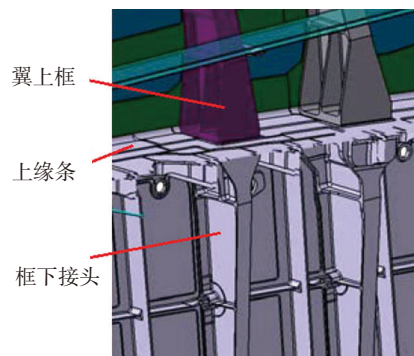


图9 A350翼上框端连接结构
Fig.9 Joint structure of A350 over wing frame

量;在外翼一侧是对接,使得装配开敞,有利于装配效率。装配时以后梁为基准,误差累积到前梁,可以通过现场加工前梁对接带板来补偿;这是一种先进的复合材料结构少无应力装配方法^[1],称之为“照相机法”。但这种一侧搭接一侧对接的结构会造成传力路线在1号肋平面处错位,须三叉接头(前梁处)或四叉接头(后梁处)的腹板增加材料过渡,见图10中A-A视图和图11。

为减小错位量,A350飞机中央翼前梁平面和对接界面(1号肋平面)的交线在外翼前梁平面和对接界面的交线前方。中央翼后梁平面和对接界面的交线在外翼后梁平面和对接界面的交线后方。

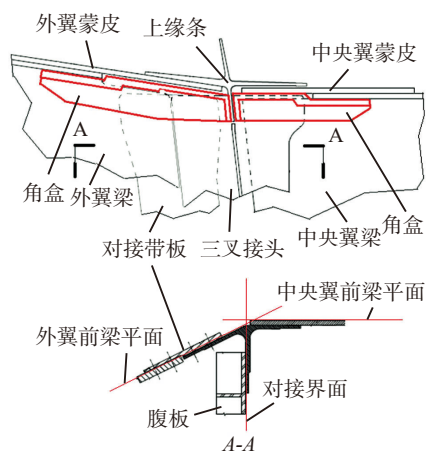


图10 A350外翼/中央翼梁对接
Fig.10 Spar joint of A350

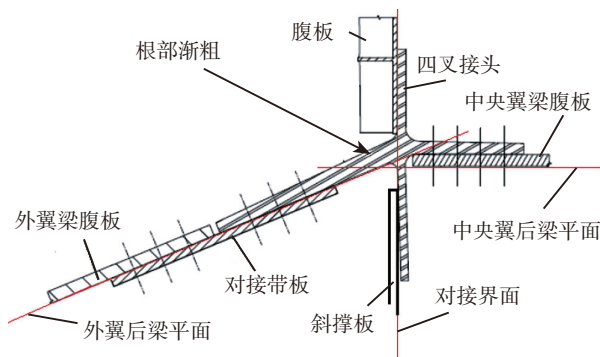


图11 四叉接头根部逐渐变厚
Fig.11 Gradually thickening on cruciform root

由上可知,A350的外翼/中央翼梁对接是在保证装配开敞的前提下,考虑了尽量使结构效率增加,避免增重。

2.3 斜撑板连接

A350的中机身有后梁框,外翼后梁传来的升力载荷主要通过后梁框传递到机身,斜撑板分担一部分的升力载荷传递到起落架舱上的机身框,见图12。斜撑板和“十”字形后梁对接接头直接连接,见图11。

总装

翼身对接界面的选择会影响中机身蒙皮分块,从而影响机身段对接界面,使得前机身、中机身、后机身在不同的站位分段,进而影响全机大部分对接总装的路径。

1 波音787

波音787的翼身对接界面在机身最宽处,见图2,其中中央翼前/后梁处的三角区较大,蒙皮在前梁处分块,从机头到中央翼前梁为前机身段,从中央翼前梁到起落架舱后端框为中机身段。

前机身和中机身的对接界面与翼身的对接界面非常接近,为避免同时装配时人员设备等产生干涉,影响装配效率,总装时先将中央翼盒、前机身段、中机身段组装成一体;再到总装工位同时装左/右外翼和机头段、后机身段,见图13。

2 A350

A350的翼身对接界面相对波音787向机身内侧移动较多,使得其中中央翼前/后梁处的三角区较小,并且过渡面为曲面,蒙皮在中央翼前梁框之前的机身框处分块,从机头到蒙皮分块处为前机身段,从之后到起落架舱后端框为中机身段。

装配时先将中央翼盒和中机身段装为一体;前机身段和机头组装成组合体;最后翼身对接的同时,组装组合体和后机身段,见图14。



图12 A350斜撑板连接
Fig.12 A350 trap panel

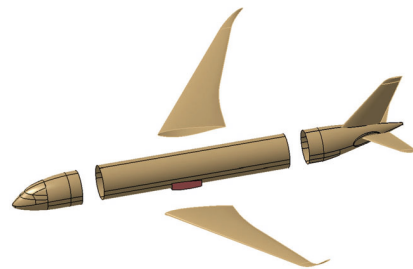


图13 波音787总装示意图
Fig.13 Final assembly of Boeing 787

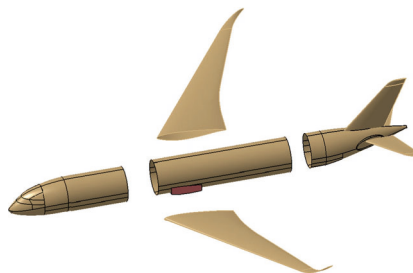


图14 A350总装示意图
Fig.14 Final assembly of A350

3 自动钻铆

自动钻铆技术是实现飞机装配自动化的必然途径,可极大地提高装配质量与装配效率^[12]。A350和波音787的翼身对接结构都考虑尽量可使用自动钻铆设备。图4和图8中两种机型的壁板对接结构,从前梁到后梁都是平整的排钉,有利于采用自动钻铆。自动钻铆是从壁板外侧向内侧制孔,需要相应的设备空间。在选择翼身对接界面时须考虑外翼上壁板和机身侧壁板之间的角度不宜过小,否则会因制孔空间的要求而使对接结构的第一排钉距离对接界面较远,造成对接结构增重和相关零件制造难度增加,见图15。

国内技术状况及相应设计思路

在国内尚没有在民用客机上采用复合材料机翼壁板,也就没有关键连接区金属材料复合材料混合连接结构的设计经验。可借鉴国外先进民机的方案并加以分析和试验验证,从而获得适合国内工艺水平的对接结构是正确设计思路。

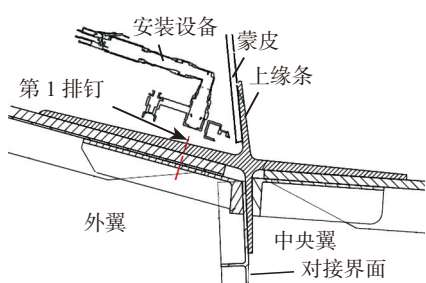


图15 自动钻铆示意图
Fig.15 Automatic drilling unite

以国内某预研机型为例,机型规模与波音787、A350相当;机翼壁板采用复合材料;从工艺成熟和稳定性考虑,长桁取“T”形。

思路1:“T”形长桁的壁板对接结构可参考A350,上壁板对接采用长桁接头,下壁板对接采用插入式,见图8。上/下缘条和对接带板如采用铝合金,则需要做铝合金和复合材料的相容性研究,即温度载荷和异电位腐蚀研究。如采用钛合金,因A350对接结构的上/下缘条展向宽度较大,航向长度5m多,钛合金的上/下缘条制造难度将非常大,需要做工艺研究。

思路2:在基本借鉴参考机型的基础上,做细节改进。上/下缘条和对接带板采用钛合金,再在设计中控制上/下缘条的展向(宽度)尺寸,使其既能利用钛合金和复合材料相容性好的优点,又不至于难以制造。这样需要做对接结构的选型研究。例如上壁板对接结构见图16,下壁板对接结构见图17。

图16中上缘条和图17中下缘条在展向一侧都只有两排钉,宽度得到控制。

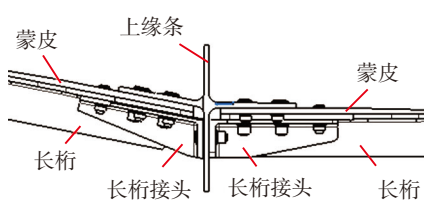


图16 一种上壁板对接形式
Fig.16 A type of upper panel joint structure

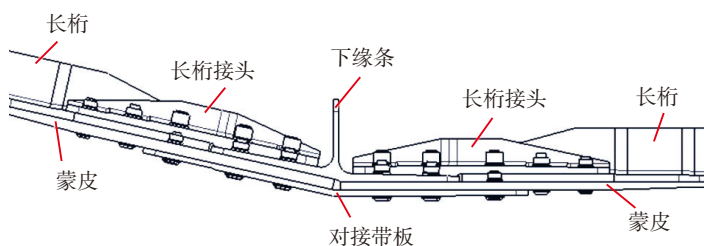


图17 一种下壁板对接形式
Fig.17 A type of lower panel joint structure

无论设计思路1或思路2都是在借鉴先进机型的基础上,并完成分析和试验验证才能成为合理的为我所用的对接方案。

结论

本文比较了A350飞机和波音787飞机两种翼身对接结构,二者的特点如下:

(1)波音787飞机翼身对接界面选择在机身最宽处。对接是采用套合式,三叉接头保留上/下翻边,对接结构紧凑,传力直接;梁对接为搭接,长桁端头无加宽,对接区相对省重。对接肋的上/下缘条是钛合金,工艺复杂,但和复合材料的相容性好。对接结构设计间隙较多,在三叉接头翻边处装配加垫复杂。

(2)A350飞机翼身对接界面选择在外翼上翼面与机身交线处,相对波音787飞机向机身内侧移动较多。对接是采用对接和套合组合式,三叉接头无上/下翻边,利用角盒辅助对接。对接肋的上/下缘条是铝合金,工艺性好,和复合材料的相容性好。外翼侧梁对接有对接带板,下壁板长桁端头加宽。翼身对接开敞简单,相对装配效率高,而插入式下壁板对接装配加垫复杂。

民用飞机关键连接区的混合对接结构在国内尚无运用的经验,需做大量的基础研究和结构选型研究才能运用。

参考文献

[1] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册第9册: 载荷、强度和刚度[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.

Aircraft Design Manual's Editors. Aircraft design manual 9: load, strength and stiffness[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001.

[2] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册第10册: 结构设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.

Aircraft Design Manual's Editors. Aircraft design manual 10: structure design[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000.

[3] 杨乃宾, 章怡宁. 复合材料飞机结构设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2002: 205-210.

YANG Naibin, ZHANG Yining. Structure design of composite aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002: 205-210.

[4] 陈五一, 袁跃峰. 钛合金切削加工技术研究进展[J]. 航空制造技术, 2010, 53(15): 26-30.

CHEN Wuyi, YUAN Yuefeng. Research progress of titanium alloy cutting technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(15): 26-30.

[5] 汤平, 李庆飞. 民用飞机中央翼复合材料上壁板与1#肋对接选型研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2012(S1): 99-105.

TANG Ping, LI Qingfei. Structure joint analysis of composite upper wing panels and 1# rib[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2012(S1): 99-105.

[6] YANG Q D, RUGG K L, COX B N, et al. Failure in the junction region of T-

stiffeners: 3D-braided vs. 2D tape laminate stiffeners[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(7): 1653-1668.

[7] 崔卫军, 李庆飞, 李念. 复合材料机翼下壁板对接区设计与分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2012(3): 49-56.

CUI Weijun, LI Qingfei, LI Nian. Structure joint design and analysis of composite lower wing panels[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2012(3): 49-52.

[8] 中国航空研究院. 复合材料结构稳定性分析指南[M]. 北京: 航空工业出版社出版, 2002.

Chinese Aeronautics Research Institute. A guide for structural stability analysis of composite materials[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002.

[9] 汤平, 朱森虎, 赵毅. 一种民用飞机外翼与中央翼下壁板对接形式的研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2014(1): 30-34, 67.

TANG Ping, ZHU Senhu, ZHAO Yi. Research on a type of lower panels' joint of civil aircraft wing and center wing[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2014(1): 30-34, 67.

[10] 牛春匀. 实用飞机结构应力分析及尺寸设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009: 641-655.

NIU Chunyun. Airframe stress analysis and sizing[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009: 641-655.

[11] 李东升, 翟雨农, 李小强. 飞机复合材料结构少无应力装配方法研究与应用进展[J]. 航空制造技术, 2017, 60(9): 30-34.

LI Dongsheng, ZHAI Yunong, LI Xiaoqiang. Research and application advances of stress-less assembly methods for composite airframe[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(9): 30-34.

[12] 喻龙, 章易镰, 王宇晗, 等. 飞机自动钻铆技术研究现状及其关键技术[J]. 航空制造技术, 2017, 60(9): 16-25.

YU Long, ZHANG Yilian, WANG Yuhan, et al. Research status of aircraft automatic drilling and riveting system and its key technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(9): 16-25.

通讯作者: 汤平, E-mail: tangping@comac.cc。

Comparison and Analysis on Outer Wing-Fuselage Connection of Two Civil Aircrafts

TANG Ping

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

[ABSTRACT] A350 aircraft and Boeing787 aircraft are the most advanced representative of modern civil aircraft, which have the relative higher composite material content. The special design forms a large number of hybrid structures between the metal and composite materials such as wing body butt structure. It is of practical significance to study the docking structure of the two models. The design principle on selection range of the wing body docking process interfaces of the civil aircraft is described. The differences and characteristics of the two types of docking process interface are illustrated, and the structures of the two types of aircraft wing panel butt, the wing beam butt and the outer wing panel-fuselage panel butt are analyzed, and the advantages and disadvantages of connection structures of the two aircrafts above are analyzed and compared in this paper. The influence of the two docking structures on wing assembly and final assembly is explained, and the domestic research status and corresponding design ideas of the hybrid structure connection are expounded. Finally, the characteristics of the docking structure of the two models are summarized.

Keywords: Butt structure; Lower panel; Upper panel; Stringer end; Notch

(责编 文竹)