

文章编号:1674-8190(2015)02-217-05

A380 客舱窗框结构设计的分析与研究

何薇,樊庆文

(中航沈飞民用飞机有限责任公司 工程研发中心,沈阳 110000)

摘要: A380 作为新一代大型客机的代表,数量庞大的大尺寸舷窗设计是众所瞩目的关键课题之一。通过与其他机型采用的窗框方案对比,重点分析 A380 窗框结构方案的优势,研究窗框结构的受力情况,将静力试验数据与有限元分析结果对比验证,从主结构的材料选用方面将 A380 的锻件窗框与不同材料的窗框进行对比分析。结果表明:A380 客舱窗框结构的设计概念与现有机型相比,有效降低了加工复杂性、制造风险及研制成本,可为后续机型的窗框设计提供借鉴和参考。

关键词: A380 舷窗;窗框结构;GLARE 铺层;材料选择;有限元分析

中图分类号: V223

文献标识码: A

Analysis and Research on the Design of A380 Cabin Window Frame Structure

He Wei, Fan Qingwen

(Research & Development Center, AVIC SAC Commercial Aircraft Company, Ltd., Shenyang 110000, China)

Abstract: As the representative of the new generation large commercial aircraft, the design of a large quantity of big cabin windows on A380 is one of the key points. The analysis is focused on the advantages of the window frame structure concept on A380, in contrast with some other aircrafts. Besides, the load condition of window frame structure is analyzed, and the result of FEM analysis is verified by static test data. Then from the aspect of material selection, the die forging window frame on A380 is compared with some other materials. The research shows that the design concept of A380 cabin window frame structure effectively reduces the processing complexity, manufacturing risk and development cost, in contrast with some other aircrafts. This paper can be the design reference of the subsequent aircraft window frame.

Key words: A380 cabin window; window frame structures; GLARE lamination; material selection; finite element analysis

0 引言

随着航空产业的快速发展,国际上飞机研发的龙头企业争相研制出使用效率、经济性、乘坐舒适便利且环保等综合性能更高的新一代大型客机^[1]。其中,最具代表性的是欧洲空中客车公司研发的双层客舱 555 座级的超大型客机 A380^[2]。国内航空行业也开始关注具有自主知识产权的大型客机的

研制,但考虑到该方面技术与经验的积累、整体基础工业的现状与水平,这项任务十分艰巨。为了使国产大型客机的研制周期缩短,研制费用、制造成本降低,在国际市场具有竞争力,开展概念创新和提高精细设计水平是其关键和核心^[3]。

对于新一代大型客机来说,尺寸大、数量多的客舱窗框结构是机身设计的关键内容之一。由于受机身开口、机舱增压和温度变化的影响,其结构方案的定义、强度刚度的校核、材料的选用等方面都需要经过全面考虑和深入研究。而国内对于上述方面的研究成果十分有限。为了填补该领域的空白,本文着重介绍国际先进大型客机 A380 窗框

收稿日期:2014-12-04; 修回日期:2015-02-05

通信作者:何薇, kewenlydia@163.com

的设计经验,对 A380 窗框的结构方案、受力情况及材料选用等进行详细研究,对比分析 A380 的窗框结构相较于其他机型的优势,对在研的或后续的新机设计具有一定指导意义。

1 A380 舷窗概述

A380 的舷窗在机身两侧,呈对称分布,双层客舱共 220 扇,其中上层 104 扇,下层 116 扇。舷窗在整个机身上的布局可以为所有座位上的乘客提供良好的视野,A380 的舷窗布置如图 1 所示^[4]。



图 1 A380 舷窗布置情况

Fig. 1 Distribution of windows on A380

2 A380 窗框组件结构方案的分析

2.1 外形尺寸

A380 的每个舷窗都是等大的,可视区域为宽 265 mm、高 370 mm,在机身隔框间均匀布置。实际窗框的最大尺寸为宽 462 mm、高 537 mm,如图 2 所示。大尺寸舷窗的使用提高了乘客乘坐的舒适度。

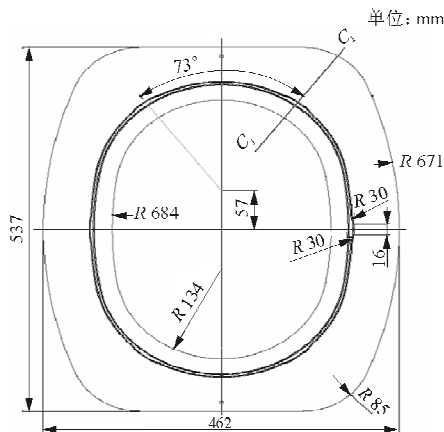


图 2 窗框结构的尺寸信息

Fig. 2 Size of window frame structures

2.2 方案分析

舷窗由窗框结构和窗格玻璃两部分组成,通过密封件及紧固件连接在一起,如图 3 所示,然后通过螺栓与蒙皮(或加强板)进行连接。为了防止影响气动外形,选用 100°沉头自锁螺栓,同时窗框和蒙皮连接的缝隙采用气动密封。

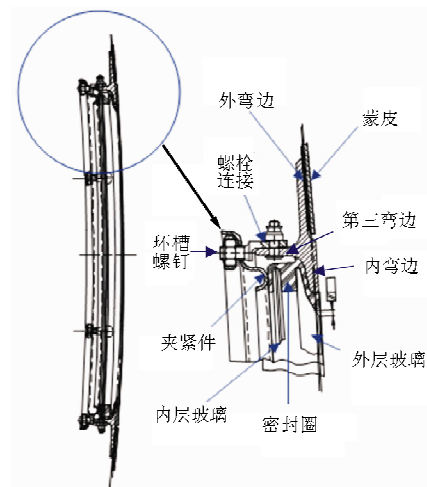


图 3 舷窗组件结构方案

Fig. 3 Structure concept of window assemblies

2.2.1 窗框结构

从图 3 可以看出,内层玻璃由夹紧件(Retainer)和六个夹持紧固件(类似于环首螺钉)通过螺栓连接嵌入窗框中。夹紧件的主要功能是把密封圈压紧在窗框上(如图 2 所示),其中截面 C_1 关于舷窗中心轴对称的四个平面和舷窗顺航向中心轴所在剖面,即为六个螺栓连接的位置。

A380 的窗框截面为 T 型,在机身外侧设有下陷以便与蒙皮加强板组成飞机的外形线。窗框包括三个弯边,外弯边将整个窗框和蒙皮连接到一起,内弯边用于容纳窗格玻璃,第三弯边是一个加强筋,起到止裂及安装夹紧件的作用。

波音系列飞机的金属窗框多与 A380 的窗框方案相似。例如:B747-200 的外层和中间层玻璃采用十个弹簧夹安装到窗框中,弹簧夹将密封圈压紧在窗框组件形成压力密封,如图 4 所示。

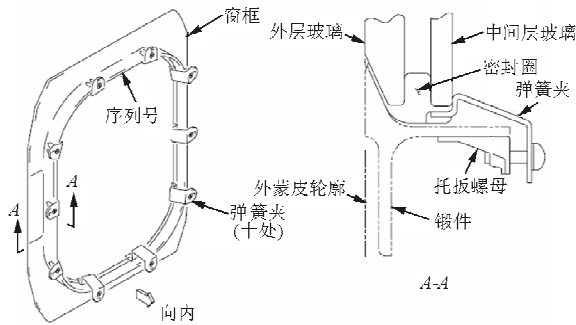


图 4 B747-200 窗框结构

Fig. 4 Window structures of B747-200

B747 方案中的弹簧夹是通过托板螺母和小支架连接到窗框的第三弯边上的,连接位置必须避开中间层玻璃和密封圈以免发生干涉,导致在十个弹簧夹的安装位置,第三弯边都会有框缘凸起。对于锻件来说,若是一次成型,则加工这些凸起部分所需的模具制造复杂、成本增加;而若是先锻造再机加,则锻件第三弯边的高度必须达到弹簧夹所需的安装高度,造成整体材料成本增加,并且多了一道机加工序。

A380 在第三弯边和密封圈之间为螺栓连接留出了空间,允许螺栓连接与密封圈在同一框高位置,减小了中间层玻璃和密封圈的面积,有效降低了窗框的整体高度,同时大大降低了锻件的加工复杂程度。通过采用整圈的夹紧件形式减少连接点数量,仅需设置六个螺栓连接位置,节省了装配工时。

A320 的窗框结构方案和 A380 类似,A380 在夹持紧固件上作了优化。A380 的夹持紧固件轴线与第三弯边在同一平面上,而 A320 则是将夹持紧固件(环首螺钉)贴靠在第三弯边外侧。A380 的优化设计不仅不影响窗口可视区域,还减小了夹紧件的半径,如图 5 所示。

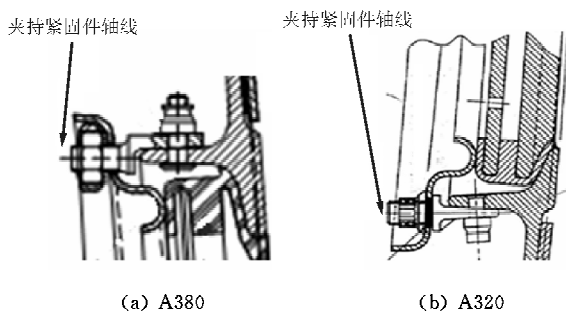


图 5 A380 与 A320 窗框结构方案对比

Fig. 5 Comparison of window frame structures concept between A380 and A320

2.2.2 窗格玻璃

A380 的舷窗玻璃由丙烯酸树脂(即有机玻璃,又称亚克力)定向拉伸而成^[5]。每个舷窗由三层玻璃组成,最里面一层是装饰性的,不承受载荷;外层玻璃厚度为 9.5 mm,中间层玻璃厚度为 4.0 mm。在外层玻璃失效的情况下,中间层玻璃必须能够承受全部的压差,属于破损—安全结构,这是失效安全性的设计要求。外层和中间层玻璃之间有硅橡胶沿周缘隔开,在中间形成空隙,它对吸收撞击能量起到很大作用,还是良好的隔音层和绝热层^[6]。

在中间层玻璃的底部中间位置有一个小排气孔,用来平衡正常操作情况下中间层玻璃的压力,以确保外层玻璃首先承载。另外,使用多层玻璃且带有排气孔的设计还能防止舱内热气及湿气造成玻璃上雾或结霜。

3 受载情况及强度分析结果

在载荷平衡状态下,机身侧壁板主要承受垂尾传来的扭矩所形成的剪力,增压和剪力是主要设计载荷。为了防止蒙皮在受压和受剪时失稳,需要安装隔框等加强构件^[7-8]。在对整个机身结构的静力分析中,等直段复合材料机身蒙皮结构在增压载荷作用下的有限元分析显示,最大应变及应力均出现在窗口处。这是由于在窗口处桁条被切断的缘故^[9],机身的扭矩对窗开口有巨大影响。采用平面应力模型分析,应力最高的区域在框角位置。

3.1 关键受载区的四个典型窗框位置

根据全机有限元分析的结果,有四个窗框区域被识别为关键受载区。这四个位置分别为:M/D C30、M/D C41、U/D C45 和 M/D C84,如图 6 所示。M/D 表示机身中间基准,U/D 表示机身上部基准。

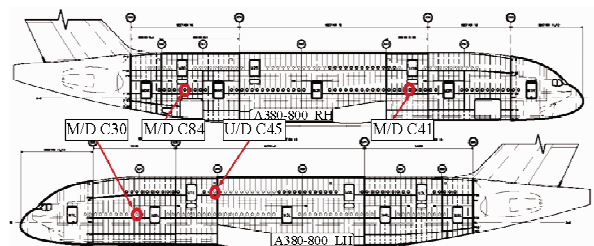


图 6 四个关键受载区的舷窗位置

Fig. 6 Window position of the four critical areas

3.2 强度分析结果在静力试验中的验证

通过对窗框结构的强度分析,在两倍气密载荷极限载荷等五个关键工况下,计算得到舷窗开口圆角处的应力比较大,为结构关键区域。

在上述四个关键舷窗位置,静力试验中分别使用应变仪测量其应变,并将强度分析结果与静力试验结果相比较。试验结果与计算结果的应力值非常接近,充分验证了强度分析的正确性。

四个关键受载位置之一的左侧 M/D C30 舷窗区域在座舱压力工况下的分析对比情况,如图 7 所示。其他三个关键受载位置的对比结果与其相似。

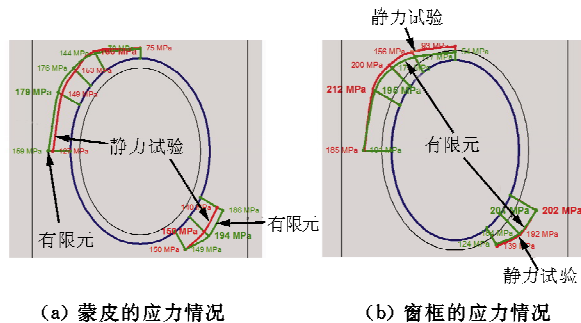


图 7 左侧 M/D C30 在座舱压力工况下的应力情况对比
Fig. 7 Stress condition under cabin pressure load case at C30, M/D, LH

4 材料选择

4.1 舷窗开口处蒙皮材料

A380 机身蒙皮根据壁板的不同位置选用不

表 1 模锻件窗框、复合材料窗框与板材机加窗框对比

Table 1 Comparison of window frames among die forging, composite and metallic plate

窗框类型	对比项						
	强度	重量	工装	周期	成本	加工	风险
A380 模锻件窗框	强度、刚度高,但纤维方向不好控制	重	工装及模具较复杂	原材料采购周期长	数量较多时成本非常低	相对简单	方案变更时需重新采购
复合材料窗框	切断纤维引起层合板强度和刚度下降,孔边应力集中和边缘效应会引发孔边局部提前破坏	轻	视具体成型方法而定	制造周期长	成本高	制造复杂,精度低	分层整个报废,内部裂纹不可检,受环境影响,原料保存期限短
金属板材机加窗框	原材料高强度、韧性好,板材机加成 T 型截面垂直纤维方向强度下降	重	工装简单,数控加工	制造周期短	数量少时成本相对低,数量多时数控加工成本相对高	加工量较大,精度高	方案变更影响小

同的材料,包括玻璃纤维增强的铝合金夹层复合材料(GLARE)和不同的铝合金。A380 机身蒙皮壁板共采用了 27 块 GLARE 板,最长的一块长为 11 m,总面积达 470 m²[10-12]。关键受载的四个舷窗位置所采用的蒙皮皆为 GLARE。

GLARE 是由铝合金薄板(厚度为 0.25 mm 的 2024 或 7075 铝箔)和玻璃纤维增强环氧聚合物复合材料铺层交替排列压制而成的一种纤维-金属层合板(fiber-metal laminates),如图 8 所示。采用 GLARE 板可以较好地解决机身外来物冲击导致的损伤容限难题[13]。

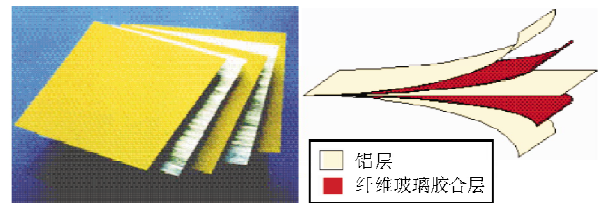


图 8 GLARE 板构成示意图
Fig. 8 Construction of GLARE

4.2 窗框材料

部分新机型上曾使用过复合材料窗框,例如 A350 的 RTM 窗框和 B787 的压注窗框。而现有机型上大多使用金属窗框,例如 C 系列使用的铝合金 7475-T7351 板材机加, A380 使用的模锻件窗框材料等。模锻件窗框、复合材料窗框与板材机加窗框对比如表 1 所示。

从表 1 可以看出,金属窗框比复合材料窗框实用性更强、成本低、精度高,加工过程及保存易控制。一般只有采用复合材料机身时,才考虑采用复合材料窗框。若铝合金的蒙皮却采用复合材料窗框,则窗框结构无法有效地滞止开口处蒙皮的裂纹扩展,进而可能导致金属壁板增加厚度而增重,并且铝合金机身和复合材料窗框还会发生电化腐蚀。A380 上的 GLARE 蒙皮最外层是铝铺层,具有金属性质,曾考虑过使用 RTM 窗框,但最终仍决定采用金属窗框。

对于 A380 大量的金属窗框来说,采用随数量增多成本急剧下降的模锻件窗框比机加板材更适合。B747/757 使用了 7075-T73 锻件作为窗框材料,而 7175 的模锻件比 7075 的锻件具有更高的静强度、韧性和疲劳特性。空客公司在成熟机型 A320 的窗框材料上采用过 7175-T73 锻件,窗框结构概念也相似,经过长时间的验证,该材料在窗框结构上的使用是非常可靠安全的。A380 的窗框由落压模锻方法成型,典型的截面尺寸如图 9 所示。

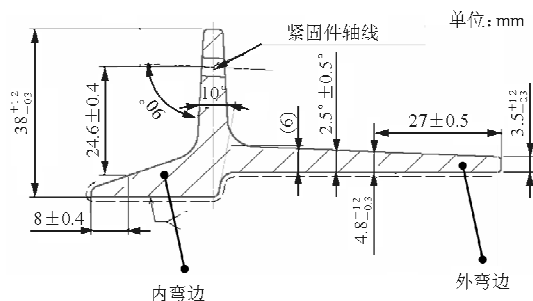


图 9 窗框的典型截面尺寸

Fig. 9 Typical section size of window frame

5 结束语

空客 A380 作为新一代大型客机的代表,其机身的结构设计及材料选用等方面在国际上均具有先进性,其机身开口特别是窗框结构的设计较为典型。

A380 窗框结构的概念与现有机型(例如波音 747 使用的典型弹簧夹方案)相比,有效降低了制造复杂性和成本。另外,对于夹持紧固件的优化设计,和与其有着相似结构概念的 A320 等机型相比,有效的降低了原材料消耗。在材料选用方面,A380 的模锻窗框比一些机型上采用的复合材料

窗框和板材机加窗框更加经济,加工复杂性及制造风险更低。上述设计优势是 A380 在大型客机市场上具有竞争力的潜在因素,也是提高飞机经济性、舒适性的设计参考。

从国内航空产业现状来看,在设计细节上进行改进,降低研制成本,是开发国产大型客机的必然选择。

本文对 A380 窗框结构的研究还存在不足,仅集中展示了窗框结构的静强度分析,而对耐久性 & 损伤容限评估方面的分析,将在后续的研究中进行探讨。

参考文献

- [1] Committee on Aeronautical Technologies, Aeronautics and Space Engineering Board, Commission on Engineering and Technical Systems, et al. Aeronautical technologies for the twenty-first century[M]. Washington: National Academy Press, 1992.
- [2] Jérôme PORA. Composite materials in the Airbus A380 from history to future[EB/OL]. [2014-12-04]. <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM13proceedings/SITE/PAPERS/paper-1695.pdf>.
- [3] 宋笔锋, 张彬乾, 韩忠华. 大型客机总体设计准则与概念创新[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 583-595.
Song Bifeng, Zhang Binqian, Han Zhonghua. The study of concept design criteria for large-scale passenger aircraft with new technologies[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 583-595. (in Chinese)
- [4] Julian Moxon. Airbus A380 aircraft profile[EB/OL]. (2007-02-27) [2014-12-04]. <http://www.flightglobal.com/news/articles/airbus-a380-aircraft-profile-205274/>.
- [5] 季光明. 大型商用飞机客舱舷窗有机玻璃应用进展[J]. 世界橡胶工业, 2012, 39(6): 48-51.
Ji Guangming. Application and development of cabin window acrylic materials for commercial aircraft[J]. World Rubber Industry, 2012, 39(6): 48-51. (in Chinese)
- [6] 罗腾腾. 关于某型飞机客舱舷窗组件设计的分析与研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2012(3): 57-60.
Luo Tengting. The analysis and research on the design of the aircraft's cabin window[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2012(3): 57-60. (in Chinese)
- [7] 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.
Yang Naibin, Zhang Yining. Composite structural design for airplane[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [8] 鄭正能. 飞行器结构学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.

(下转第 238 页)

- neering handbook*. Aviation manufacturing engineering handbook-heat treatment[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1994. (in Chinese)
- [14] 《弹性元件质量问题及技术改进选编》编辑委员会. 弹性元件质量问题及技术改进选编[M]. 太原: 中航工业太原航空仪表有限公司, 2008.
Editorial Board of *elastic components and technology to improve the quality of selected*. Elastic components and technology to improve the quality of selected[M]. Taiyuan: AVIC Taiyuan Aviation Instrument Co., Ltd., 2008. (in Chinese)
- [15] 俞尚知. 焊接工艺人员手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1991.
Yu Shangzhi. *Welding technologist handbook*[M]. Shanghai; Shanghai Science and Technology Press, 1991. (in Chinese)
- 作者简介:**
张永红(1973—),男,工程师。主要研究方向:航电机载设备空速— Ma 。
郭 凯(1986—),男,助理工程师。主要研究方向:航电机载设备高度表。
刘海珍(1986—),女,助理工程师。主要研究方向:大气数据传感器。
- (编辑:马文静)

~~~~~

(上接第 221 页)

- Li Zhengneng. Aircraft structure[M]. Beijing: Beihang University Press, 2005. (in Chinese)
- [9] 李晓乐. 大型飞机复合材料机身结构设计[C]//第十届中国科协年会论文集(三), 郑州: 中国科学技术协会, 2008: 1664-1669.  
Li Xiaole. The structural design of composites of large airplane fuselage[C]//Collection of the 10th annual meeting of the China Association for Science and Technology (3), Zhengzhou: China Association for Science and Technology, 2008: 1664-1669. (in Chinese)
- [10] 陈绍杰. 复合材料与 A380 客机[J]. 航空制造技术, 2002(9): 27-29.  
Chen Shaojie. Composites and airliner A380[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2002(9): 27-29. (in Chinese)
- [11] 鲁 隽. 用先进结构和材料精心打造 A380[J]. 国际航空, 2004(1): 41-42.  
Lu Jun. Advanced structures and materials of A380[J]. *International Aviation*, 2004(1): 41-42. (in Chinese)
- [12] 张纪奎, 酆正能, 程小全, 等. 复合材料整体结构在大型民航机上的应用[J]. 航空制造技术, 2007(9): 38-43.  
Zhang Jikui, Li Zhengneng, Cheng Xiaoquan, et al. Application of composite integrity structure in large commercial jet[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2007(9): 38-43. (in Chinese)
- [13] 杨乃宾. 新一代大型客机复合材料结构[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 596-604.  
Yang Naibin. Composite structures for new generation large commercial jet[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(3): 596-604. (in Chinese)
- 作者简介:**  
何 薇(1982—),女,硕士,工程师。主要研究方向:飞机结构设计。  
樊庆文(1982—),男,工程师。主要研究方向:飞机总体设计。
- (编辑:马文静)

~~~~~

(上接第 232 页)

- [16] Yun Seong Lee, Dong-Jin Kim, Jin-O Kim. New FMECA methodology using structural importance and fuzzy theory [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(4): 2364-2370.
- [17] 康锐, 石荣德. FMECA 技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 35-40.
Kang Rui, Shi Rongde. FMECA technology and its application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 35-40. (in Chinese)
- [18] Anmei Zhou, Dejie Yu, Wenyi Zhang. A research on intelligent fault diagnosis of wind turbines based on ontology and FMECA[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2015, 29(1): 115-125.
- 作者简介:**
火建卫(1974—),男,高级工程师。主要研究方向:可靠性设计、分析等。
李雅琳(1966—),女,高级工程师。主要研究方向:可靠性设计与分析。
薛海红(1968—),女,高级工程师。主要研究方向:可靠性设计、分析、试验。
- (编辑:赵毓梅)