



# 波音787复材机身段的制造技术

Manufacturing Technology of Fuselage Section for Boeing 787

北京航空航天大学 范玉青

**这种由复材组成机身的787客机,是全球第一款利用高科技碳纤维复合材料打造的客机,机身段省去1500块铝合金钣金零件和4~5万个连接件,使机体结构件尺寸变小,但更轻盈坚固。**

由于复合材料结构有着许多众所周知的优点,在对复材结构做了大量成功的研究试验基础上,波音公司决定787机体主要结构大规模地采用复合材料。由777飞机复材用量的12%一步跨越到50%,即机身和机翼壳体几乎都由碳纤维增强复合材料制成,仅少数机体部位应用铝合金或其他材料。而空客公司原来的A350设计方案是在A330飞机基础上进行的,机身仍是以铝合金的铆接结构为主,复材用量仅为35%,这样,波音787就大幅度地拉大与A350复材用量的差距。

对于波音的竞争对手空客公司来说,客机的超大型机身复材部件的制造技术是一个难于逾越的巨大挑战。这种由复材组成机身的787客机,是全球第一款利用高科技碳纤维复合材料打造的客机,机身段省去1500块铝合金钣金零

件和4~5万个连接件,使机体结构件尺寸变小,但更轻盈坚固。它的维修成本可节省30%,飞行的舒适性有很大提高,得到很多航空公司的欢迎。因此,国际上各航空公司期待着这一“绿色”客机能给空中旅行带来革命性的变化。

但是,在竞争的另一方——欧洲空客公司,出于竞争的多种原因,一时在欧洲上空出现了很多不利于波音787研制的不同声音。空客公司提出四点理由来批评波音公司:其一,认为波音采用两倍于A380上复材用量的做法在技术上是冒进的,过多采用复材结构是一种不明智的选择,有的甚至说这是一种不负责任的做法;其二,现有的复合材料

对于机体的许多部位不适用,技术还不成熟。其三,在引进新材料和新工艺的过程中应采取循序渐进的方式;其四,碳纤维增强复合材料确实具有重量轻的优越性,但目前原材料价格上涨了500%,经济上的合理性值得商榷。

英国《泰晤士报》于2006年1月7日发出“用塑料制造机身是否安全?”的文章。英国《新科学家》周刊于2006年7月15日发出警示信号——复合材料:航空业的“致命伤”。空客在它的A350客机的研制中也体现了这一思想,一直坚持A350客机的复材用量为35%,而大大低于787的复材用量50%。

在这场大西洋两岸的激烈争论中,波音和空客的用户——国际上的主要航空公司——很明显地倾向波

音 787 飞机的方案。这是因为,他们知道波音 787 的方案虽然跨度大了一些,有一定的风险。但是,波音具有长期在军机上应用复材的经验,加上 787 方案也是建立在科学研究的基础上的。波音充分利用以美国 NASA 为首的有关飞机复材部件研究的两个十年计划项目的成果,即飞机能源效率项目 AirCRAFT Energy Efficiency (ACEE) Program (1975 ~1986) 和先进复材技术项目 Advanced Composites Technology (ACT) Program (1985 ~1997)。这样空客在国际上主要航空公司的抱怨和压力下,不得不一次次修改 A350 的总体方案,直到 2008 年才宣布 A350XWB (eXtra Wide-Body) 的最终设计方案, A350 的机身也用复材制成, A350 客机的复材总用量达到 52%。同时宣布, A350 客机的研制计划推迟整整三年。所以,波音 787 的复材应用方案与 A350 的巨大差异性,造成了竞争对手空客公司如此严重的被动局面。

### 全球化协同工程化 787 客机

过去,波音标准的研制方法是在公司内设计好飞机 (design the plane in-house),然后把飞机的零部件或一整段机体的图纸送到它们制造伙伴的工厂去生产。而这次在研制 787 客机中,波音彻底地改变了研制方法,也改变了研制流程,它利用达索 (Dassault) 公司的 PLM 套件创建的全球协同平台 GCE,与合作伙伴协同研制 787 客机。最重要的是,全世界大约 6000 余名工程师联合起来共同设计和工程化 787 客机。波音 787 机体分段研制的工程化情况:合作伙伴包括意大利的阿里尼亚 (Alenia) 航空制造公司,负责研制机身 44 和 46 段;日本的富士重工 (FHI) 负责研制机翼翼盒 12 段、川崎重工 (KHI) 负责研制主起落架舱 45 段和机身 43 段、以及三菱重工 (Mitsubishi) 负责研制中央翼盒 11

段 (如图 1);北美的古得里奇公司负责制造发动机短舱和反向装置;美国的 Spirit 公司负责制造机头 41 段,美国沃特 (Vought) 公司负责研制机身 47 段和 48 段;以及全球航空制造公司负责 47 段和 48 段对接装配等,如图 2 所示。最后,波音公司利用 747-400 改装的超大型运输机 LCA 运输 787 部件,负责把世界各地制造的十几个大部件,运到波音进行对接总装、试飞和最后的交付工作。

### 部件壳体的制造过程

现以 787 客机机头 41 段部件为例,说明其制造和装配的过程。

41 段部件的制造。首先构建复材部件壁板 (包括长桁) 的成型模具 (型胎),这型胎是组合式的,便于装拆。其上有长桁内槽,先把预制好的复材长桁放到内槽里,然后进行缠绕操作,再进入固化炉成型。成型后再进行切边钻孔等机械加工,最后喷漆。

如图 3 所示,787 的不同复材机身段在缠绕机上正在进行缠绕的成形过程。复材部件固化炉直径达 10 米,长度 24 米。图 4 为已固化好的 787 的机身段。图中清楚地表明:由于已固化好的机身段内部结构件仅有长桁,不足以维持它的外形,所示其内部用工装临时支撑。

### 复材部件的数字化钻孔和连接装配技术

上面仅把复材蒙皮和长桁胶接固化在一起,还需要把机身隔框等零



图1 787的11和45段 (已装配成一体)



图2 787机身47和48段 (已装配成一体)

件连接装配上。在复材部件装配中,一般采用机械连接方法,将复合材料构件或金属零件与机身壳体装配在一起形成部件。由于复合材料构件的特殊性,它的连接方法与金属零件的装配方法有所不同。

787 客机机身大部段壳体的框基本上都是复合材料。考虑到复材机体结构的特殊性,钻孔时材料层间容易劈裂,而且又不适宜敲打,所以它们的连接不能用一般的铆接技术;另一方面,考虑到 787 客机的生产批量大,数量巨大的孔需要钻制,为此波音和合作伙伴研制了专用的数字化钻孔铆接设备和相关的工艺技术,以此确保 787 客机的装配连接。

由于机身部件由不同公司负责设计和制造,机身部件的结构也不一

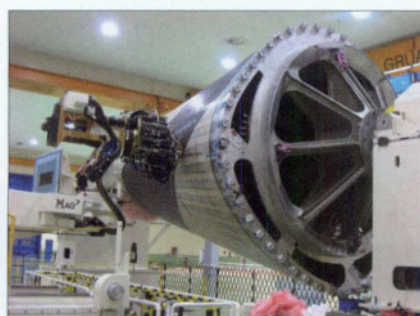


图3 机身段的缠绕

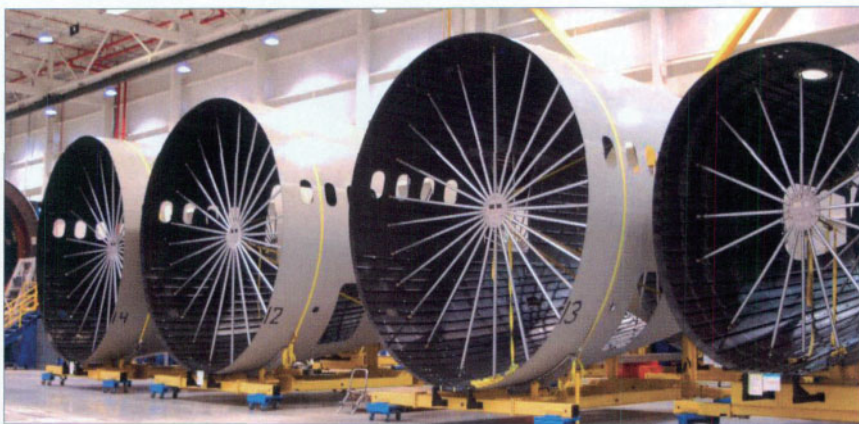


图4 已固化好的机身段壳体

样,所用的技术和装备也有所不同。美国Spirit公司针对机头41段的“锥形”结构应用数字化龙门式机械手进行铆接装配。美国沃特公司负责的47和48段应用龙门柱式数字化铆接装配机,如图5所示。而日本名古屋的川崎重工采用独立柱式数字化铆接机械。

这里着重说明在日本名古屋的川崎重工负责设计和制造波音787的机身43段的情况。

### 川崎重工的独立柱式数字化铆接机械

位于日本名古屋的川崎重工负责设计和制造波音787的机身43段,它和其他机身段一样,是由单块筒体(One-Piece-Barrel, OPB)复材结构组成机身段的,这对制造和装配工作提出了挑战。若采用传统方法,则自动化铆接机的直径要达6米,将是十分庞大而笨重的机械,势必导致工作效率低下,精确度难以保证。川崎重工则另辟新路,应用电磁铆接技术(Electromagnetic Riveting, EMR),它由两个独立的较小的柱式机器组成,这样减小了它的整个外形轮廓,以便提供较快的铆接速度、较高的可靠性和铆接精度。所以,优化铆接机械的轮廓大小和使用电磁铆接技术EMR是达到在要求的定位精度下保证可靠的连接过程的关键。

川崎重工需要用来在固化后的机身43段内部铆接框一类结构件的自动化装配工作站。由于铆接单块筒体OPB复材结构机身段需要铆接机械具有两个工作头,即在OPB的里外两侧各有一个铆接工作头才能完成铆接工作。对于这样的自动化铆接装备的制造者来说,在技术上有几个新的挑战,也即关键技术如下。

(1)对连接过程力的考虑。在铆接过程中,机身的单块筒体OPB两侧的工作头之间产生作用力才能完成铆接,如图6装配工作站所示。对于一定直径的连接件需要作用力达3000kg。在这样作用力的情况下,还需保持单块筒体OPB两侧的铆接工作头的精确对准。而连接件的准确定位常常受到工作空间的限制,这是由于单块筒体OPB内部空间狭窄或有障碍物,导致铆接工作头难以到

达。铆接作用力的大小取决于连接件的类型。

(2)连接件类型。通常机身上有几种连接件:螺栓/套环的组合、螺栓/螺帽的组合以及单面铆接件。对于787机身段而言,成本、重量和容易安装是波音选择连接件类型的主要因素。基于这些因素,川崎重工选择了螺栓/钛合金套环的组合。但就这一装配单元来说,容易安装对于制造业者是最关键的因素。

(3)工作空间(Working Envelope)。考虑到机身筒体、支持工装和自动导航车(Automated Guided Vehicle, AGV)以及铆接机械工作头的位置等,其工作空间需要直径6m、长16m的范围。因此,在保证铆接工作能顺利进行的情况下,减少工作头定位的工作空间是一个主要目标。另外,由于单块筒体OPB复材结构机身段的原因,机体两边的铆接机械不能安置在同一基座上,两边的基座有很大的差异,导致要采取复杂的补偿技术。所以整个装置的重量要轻是十分重要的。

(4)准确性。连接件在机身筒体上的位置准确性涉及到连接强度和合理的间隙问题。所以连接件必须在各种变化条件(温度、基座等情况)下以紧公差定位。筒体壁两边的工作头对准的准确度关系到套环能否可靠地安置到螺栓上。这就要



图5 龙门柱式数字化铆接装配机

求两边独立的导轨系统保持很好的对准关系,所以补偿系统起着重要作用。从图6可以明显的看出,里外两个工作机构是完全独立的,这给控制系统带来较大的困难。还要特别关注的是控制热效应,这是由于在工作过程中机身筒体的里外两侧工作条件不一样所引起的。川崎在名古屋的工厂保持着相对大的温度范围:0~40℃。

(5) 控制系统。控制系统结构是主要影响到能否维护铆接工作站性能的因素。一个CNC控制装置负责处理定位和两个里外工作头的循环操作。高性能的CNC伺服功能很大程度上增强了系统的准确度。

(6) 可靠的套环输送工装。随后,与自动铆接装备有关的最有意义的是套环输送问题。套环输送系统包括套环从散装阶段送到铆接机械的工作头处,再把套环加载到工作头的工装上,最后套环通过工装套到螺栓的尾部。期望的可靠性是千分之一,即输送1000个套环仅有一个未准确地套到螺栓上。所以这不仅要求整个铆接系统的精度要



图7 柱式数字化铆接机械工作情况

高,而且套环输送系统本身也要很准确。

上述6个关键技术中,采用钛合金套环挤压到高锁螺栓(套环/螺栓组合)上和准确度是最重要的,这也是应用电磁铆接技术EMR的原因。这一方法将具有间距最好、重量轻、成本低和可用性好等优点。这种柱式铆接机械的铆接头是偏心式的,即其钻孔和铆接机构的转轴与它的柱式铆接机械的工作头的转轴中心偏移一个距离,这样便于它到工作空间狭窄的地方进行钻孔和铆接,这也是柱式铆接机械的一大特点,其长度为22m,精度达0.33mm。因此,它很好地完成了787机身43段的铆接工作,如图7所示。

在787段机身的制造和装配工作过程中,无论是搬运、胶接,还是喷漆等工作,都需要专用工装。

### “架外”铆接装配工作

上述仅完成了此部件的复材机身的壳体制造工作,里面还需安装机身的各种支架、角片和仪表板等其他组件,需要机身段从数字化钻铆装配机械上“下架”后进行,如图8所示,为41段部件的装配和安装过程。图中的上两图所示是有一个机械臂在内部进行自动化的钻铆工作,以及工人在对部件结构作补充性的装配工作。图中下面两图所示是在部件壳体内安装了很多电缆及其接头,以及在部件中安装各种飞行仪表及相关航电设备。

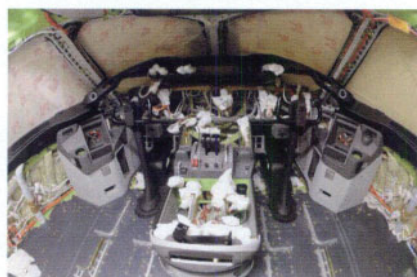


图8 机头部件41段的装配和安装过程

从此也可明显看出,部件装配不仅完成了机体结构的安装工作,并且把此部件内的各种仪表、电缆和管路等航电设备的接口也都安装好,充分体现了模块化装配思想。

### 结束语

全复材机身段是波音公司研制787客机的突破性技术进展,是他们长期科研工作的结晶。从发展眼光来看,我国大型飞机的发展也要走这条道路,所以值得我们重视和研究。

(责编 岭雾 晓立)



图6 OPB的铆接机械实物——装配工作站