

大型飞机复合材料主结构的设计与发展

CFRP Airframe's Design and Developing for Large Commercial Aircraft

中航工业第一飞机设计研究院 王德堂 冯 军

近几年,国外对低成本、高性能复合材料结构在大型飞机上的工程应用进行了广泛深入研究,取得了大量有工程应用价值的研究成果,具体体现在新设计飞机主要承力部件大量应用先进复合材料结构,如 A380 复合材料中央机翼、A400M 复材翼面与机身、波音 787 复合材料机翼等。

近几年,国外对低成本、高性能复合材料结构在大型飞机上的工程应用进行了广泛深入研究,取得了大量有工程应用价值的研究成果,具体体现在新设计飞机主要承力部件大量应用先进复合材料结构,如 A380 复合材料中央机翼、A400M 复材翼面与机身、波音 787 复合材料机翼等。

复材结构在 A380 上的应用

A380 飞机已经交付数家用户,其优良性能和舒适性被广为称道。复材用于该机的部件有中央翼盒结构,尾翼结构,襟翼、副翼结构,扰流板结构,机身上壁板、机身地板梁(跨度 6m)、机身后体球框(6.2m × 5.5m,树脂膜溶塑成型工艺 RFI)、整流罩结构等。

A380 的复材用量约占结构重量 25%,其最大设计特点就是首次将复材用于中央翼盒,并达到减重 1.5t 的效果。另外它的碳纤维复材水平尾翼整体油箱的结构半展长达到 19m,超过了 A320 的机翼半展长,号称是世界上正在飞行的最大复材整体油箱。机身上使用的 Glare 层板达到 470m²,与传统铝合金相比,减重 25% 以上,疲劳寿命提高 10~15 倍。垂尾前缘更是使用长达 14m 的 Glare 层板结构,大型整体结构的使用可见一斑。

复材结构在波音 787 上的应用

波音 787 飞机已经首飞成功,正在鉴定试飞中,交付用户指日可待。该机的主要结构均为复材结构,其复材用量占全机重量 50%,最有里程

牌意义的是使用了复材机翼、机身结构,并在结构维护上做出了实质性进展,其目标是做到比传统结构的波音 767 降低使用维护成本 30%。同时, TiGr 层板(碳纤维增强的钛板)、耐高温复合材料结构也在机翼前缘、发动机吊舱上获得应用。

复材结构在大型飞机上用量迅速上升分析

(1) 表明复材的基础研究取得了实质进展,安全性已经不再阻碍其扩大应用。

AC20-107A、B(FAA 复合材料结构设计安全性要求)要求的内容都得到了贯彻与验证,包括积木式试验验证,尤其是在结构综合设计技术研究,材料应用规范(如波音 BMS 8-276)、制造工艺、试验验证等方面(如美国的 ACT 计划和欧洲的

TANGO 计划)。正是从这些预研中探索并实践了设计、制造、试验验证流程,汲取了经验,才有了在飞机上工程化应用的底气。其主线是大型整体结构的应用,将结构的强度、刚度和损伤容限结合在一起通盘考虑。这样设计的结构,减少了结构连接,提高了使用寿命,也便于成型装配,更易于保养维护。

(2)表明结构设计手段与验证技术的进步。

如 A380 中央翼盒结构层板厚度达到 50mm 以上,对接区更是有 100mm 以上的整体结构,这都是一般分析方法和制造工艺难以企及和验证的。未经详细分析试验比对,是不可能应用的。还有比如 A380 的平尾整体复合材料油箱,也是需要大量试验验证其密封和防雷击设计。波音 787 的发动机吊舱结构长期工作在高温、高噪音的振动环境,细节分析与验证也必不可少,尤其是要弄清楚材料的设计许用值与构件设计许用值、连接区损伤与应变控制关系等。

作为新设计飞机结构,在权衡结构整体性能并关注局部和细节,按部件受力形式选择材料和成型方式,关注制造、使用维护乃至全寿命成本始终是设计追求的目标。例如将结构



波音787的复合材料机翼结构

分为按强度设计的部件、按刚度设计的部件和按功能设计三大类型,其关注核心依然是强度设计件。所有的结构问题大都出于细节设计,因而对细节设计的方法与验证更是复合材料结构设计的焦点,如长桁末端、开口周边、对接搭接区、集中载荷传递区等。

如果还走不出大量使用 $\pm 45^\circ$ 铺层、在薄壁构件上强调均衡对称、不差别使用部件设计控制应变的思路,也就是说设计部件的主次方向刚

度差异不大,没有凸显复材构件的基本特性,也就说明细节设计上还不能驾轻就熟。不大量使用自动铺带(丝)设备、不在主要部件上使用液体成型工艺和非热压罐成型工艺,就不可能实现复材部件的低成本制造。

实际上,相对层板结构而言,蜂窝结构的可设计性更大,发展潜力也更大。尤其是对涵盖功能的结构,如隐身、闪烁蒙皮、保形阵列天线、导电、隔音、降噪等,蜂窝结构都显示了独特的特性,有广阔发展前景。

最简单的复材结构设计的判据是,与同样的传统结构减重 20% 以上,全寿命综合使用(维护)成本相当。之所以将减重指标定在了 20% 以上,是考虑了复合材料结构不同于传统结构的制造生产过程,需要重新进行设备、工装投资,还有复材结构的不可再生循环(热塑性复合材料除外)、对环境的非友好等因素都是进行远期收益作风险决策的主要参考因素。但复材结构在抗疲劳、耐腐蚀、阻止裂纹扩展、隔音降噪、吸波透波等方面的功能是不可替代的,未来发展趋势是传统结构与复材结合而成的混合结构。



A350的复合材料机翼蒙皮



A400M的复合材料机翼结构

(3)表明材料性能的提高和规范完善。

一代材料支持一代飞机的理念,在近代飞机结构中得到再次验证。没有 T800S/2900-2,没有 IM6 系列材料,就没有高效率的复合材料结构。也正是有了 BMS 8-276 诸如此类的企业材料选用规范,才有了波音 787 大量使用复材结构之结果。其中成系列地详尽规范了材料的规格与性能要求,涵盖了热塑性复材和热固性复合材料(包括各种纤维、树脂、预浸织物、胶膜、加速剂、脱模剂及其辅助材料等)。有了规格齐全的材料及其配套性能参数资源,产品设计才能多样化,按功能设计做到物尽其用。Toray(东丽)、Toho(东邦)等公司高品质碳纤维(第三代纤维)及其与之配套的新型树脂体系是其延绵不断发展进步动力之源。

国内材料体系单一,规范不全,材料数据覆盖面窄,与国外材料代沟加大的趋势不容小觑。即便是针对复合材料结构的连接件,国内目前都基本是全部选用有限的进口品种。

(4)表明大型整体结构制造成本的降低及其质量的稳定。

低成本材料和制造工艺的使用,特别是自动铺带技术、非热压罐成型技术的应用等提高了制造效率,降低

了生产成本,稳定了产品质量。

对大型壁板类构件,选用模块格栅成型方法是稳定批量质量的有效方法之一,但这里涉及到复杂模块设计制造技术,还有低膨胀模块材质的选用,其核心是用分配的模具膨胀量及其重量对周边结构施加压力,从而达到稳定固化过程温度梯度对构件的影响(该方法在空客德国复合材料制造厂 Stade 大量使用,包括 A400m 机翼壁板之制造),达到缓解大尺寸结构次生应力,稳定产品质量的效果。

结束语

复合材料本身就是在与高性能轻质铝合金的竞争中前进的,经常是此消彼长,难分伯仲,特别是 7000 系列高纯度铝合金,对其竞争之势不可小视,如 7150 高强铝合金拉伸强度达到 560MPa 以上,常规性能比目前采用的高强铝合金高 10% 以上,而且具有优良的综合使用性能,在飞机上使用可带来明显的结构效益。多家研究表明,7075 铝合金用于制造机翼上壁板的优势,是当下高性能复合材料不能取代的,这就是说,单单对于机翼上壁板,再好的设计师,以目前的复材体系是不能够设计出在重量上低于 7000 系列铝合金材料的

机翼上壁板。

纵观波音与空客复材飞机结构,相比之下, A380 使用复材结构更为慎重,以继承发展为主,将全复材中央翼盒用在了高湿区与避免冲击的飞机部位(上有机身包围,下有机身整流罩保护);而波音 787 使用复材结构则是以全面创新性为主,其核心是基于高强度、中模量碳纤维与高韧性树脂材料的结构。设计理念较为大胆前瞻,但近代飞机发展研究的型号很多,最后经过用户的使用筛选留下来,形成大批量机队的才是成功的机型。

目前,飞机主结构使用复材结构的问题主要表现在以下方面。

(1)复材主结构设计、分析、验证还需要实践,其基本参照目标判断是比传统结构节省重量 20% 左右,全寿命使用成本相当。而欧洲现在正在执行的面对民用飞机的 SWK 研究计划的目标是:减重 30%,降低成本 40%,由此也可窥见复材结构发展端倪。

(2)材料性能有待提高,材料品种需要扩大,特别是 T800 级别的纤维和增韧树脂。

(3)制造质量需要稳定,研究机构的试制质量不等于企业化产品质量。

(4)使用维护要简单可行。

(5)民机与军机结构的差异(设计规范、使用环境)。细节设计、连接设计、功能设计(气密、油密、导电、隔噪等)、蜂窝夹心结构刚度等代、损伤裂纹抑制设计等都是结构设计者需要不断进修实践的。

可以预见,这些问题不得到根本性解决,市场化应用复合材料主结构的实践就走不出试制的襁褓。探索的道路还很长,还要做面向工程使用的研究与验证,在工程发展的起始阶段,为权衡结构的先进性与安全性和经济性,将重点放在传统结构上也不失为一种战略选择。(责编 良辰)