



大型军用运输机制造技术的发展趋势

Development of Large Military Freighter Manufacturing Technology

中国航空工业发展研究中心 杨玉岭



杨玉岭

助理研究员,工学硕士,毕业于南京航空航天大学机电学院,现在中国航空工业发展研究中心从事航空咨询工作,跟踪研究国外航空制造技术相关动向。

大型军用运输机作为一种特殊的战略性武器装备,其关键技术一直以来仅掌握在少数国家或制造商

手中。但随着目前航空技术的迅速扩张和飞速发展,越来越多的国家和制造商涌入该技术领域,表现出研制先进运输机的强烈需求,致使曾一度平和的运输机市场变得越来越充满竞争气息。在民用运输机领域迅速发展起来的先进制造技术也逐渐向军用运输机领域转移,以 A400M 为典型代表,先进复合材料结构制造技术、轻质合金结构制造技术、先进表面涂层技术以及自动化装配技术等一大批先进制造技术已经开始在军用运输机上得到应用,正推动着军用运输机朝着先进化方向发展。

手中。但随着目前航空技术的迅速扩张和飞速发展,越来越多的国家和制造商涌入该技术领域,表现出研制先进运输机的强烈需求,致使曾一度平和的运输机市场变得越来越充满竞争气息。在民用运输机领域迅速发展起来的先进制造技术也逐渐向军用运输机领域转移,以 A400M 为典型代表,先进复合材料结构制造技术、轻质合金结构制造技术、先进表面涂层技术以及自动化装配技术等一大批先进制造技术已经开始在军用运输机上得到应用,正推动着军用运输机朝着先进化方向发展。

大型运输机制造技术发展需求

现代作战环境对军用运输机的战略性要求越来越高。以美国为代表的西方国家对军用运输机的载重能力、机动性、隐身性以及其它飞行性能提出了新的要求。以战术运输机而言,一方面,载重能力要有很大提高,其货运能力至少要比 C-130J 提高 50% (约 30~35t),以满足在现代战场条件下空运先进重型装甲车辆或设想中的未来带有高生存力装备的武装人员的需求。因为现代作

战环境的变化导致需要空运的装备重量大增,包括 C-130 原本能够空运的 Stryker 装甲车的重量正在不断增加。另一方面,美军在阿富汗和伊拉克的作战行动已对适用于各种空运和特种作战的下一代战术运输机——先进机动概念(AMC-X)提出需求。按照设想,这种下一代战术运输机拥有 C-130 那样的货运能力,但飞得更高、更快并具备隐身性能。从这些发展形势来看,未来近、中期新一代战术军用运输机所具备的特征是:更高的有效载重能力,至少比 C-130 提高 50%;伞兵空降和装备空投能力;巡航速度更快、飞行高度更高;隐身和短距起降能力;低空发动机停车后滑翔飞行能力和全天候使用能力等。这些特征需求都对新一代制造技术提出了新的要求,低成本、减重、隐身、轻污染制造技术等将成为未来军用运输机主要的制造技术需求。

民用技术的发展已经辐射到军用运输机制造领域。近年来,诸多在民用领域得到深度发展和广泛应用的先进制造技术,如先进复合材料制造工艺已经在军用运输机上得到应用,改型或新型军用运输机的复合材料结构用量正在增加,并且应用部位正在从尾翼部件、整流罩等的次承力结构向翼梁等主承力结构发展。此外,部件的整体制造技术在军用运输机机体及发动机部件的制造方面表现出巨大的发展空间,先进的焊接技术,如搅拌摩擦焊、高能束流焊接的应用越来越多。制造技术的自动化需求也在加大,机器人、数控技术正在得到广泛和深入应用。

国外军用运输机制造计划

美国、欧洲、巴西以及俄罗斯是未来军用运输机领域几个主要的竞争者,它们的运输机制造计划在很大程度上反映了未来军用运输机制造技术的一些发展趋势。

目前美国正在发展 2 种不同方案的下一代新型战术运输机,即先进复合材料货运飞机(ACCA)和先进联合空中战斗系统(AJACS,即原 AMC-X)。ACCA 的研制是为了能在未来与欧洲的 A400M 相抗衡,这种飞机是在一种道尼尔 328J 飞机的基础之上,通过将原来使用金属制造的中后机身及尾翼更换为先进复合材料结构,来形成性能提高的新型运输机。而发展 AJACS 计划是为了能更好地满足美军新的海外作战需求。AJACS 由美国空军研究实验室与陆军合作,能确保下一代战术运输机的有效载重能力与陆军新型 Stryker 装甲车重量相匹配。但为了使 AJACS 能获得 C-130 那样的成功并成为国际市场上的竞争机型,就必须开发下一代军用航空材料和制造技术,同时还必须优先按照美国陆军而不是空军的需求进行设计。AJACS 项目的候选方案包括,洛克希德·马丁公司的 MACK(为 M-X 特种作战飞机、A-X 运输机和 C-X 加油机的英文缩写)多任务飞机概念和波音公司 C-17“环球霸王”III 大型军用运输机改型或基于 X-48B 翼身融合体(BWB)技术验证机的概念机。从美国的这些发展计划可以看出,不仅复合材料结构的大量使用是未来军用运输机的一种发展方向,而且翼身融合结构制造技术也有可能成为未来的一种趋势。此外,美国的战略、战术运输机(如 C-5M、C-17、C-130)改进、改型计划已经促使了军用运输机精益生产技术的发展。

欧洲的 A400M 运输机已成为高复合材料用量的标志性产品,可以说复合材料制造技术在该运输机上得到了淋漓尽致的应用。巴西 KC-390 是一种双发涡扇、上单翼设计的军用加油/运输机,该项目的推出进一步加强了载重 20t 级运输机领域的全球竞争。

从上述各国的军用运输机制造

计划及其需求可看出,高强轻质金属及复合材料结构制造技术将成为未来军用运输机的普遍需求。

军用运输机制造技术发展现状

减重、降低成本、提升性能、提高效率是军用运输机不断追求的目标。为了达到这些目标,结构整体化制造技术、钛合金结构制造技术、复合材料结构制造技术、自动化技术、数字化技术、精益技术等军用运输机上得到了应用。

(1) 整体结构制造技术。结构部件制造整体化不仅可以满足飞机减重的需求,而且可以节省材料、减少装配件、降低成本、提高生产效率,增加设计灵活性、可检测性,提高结构耐疲劳和抗蚀性,提升装配自动性、使装配工作更加人性化,增加确定性装配(Determinant Assembly, DA)机会、改进装配性、减少重复劳动。结构整体化制造技术尤其适用于部件尺寸规格较大的运输机,而且不同的结构部件要求采用的制造工艺不尽相同,目前最典型的整体结构主要包括:整体框、梁和整体壁板。最主要的制造技术包括:高速加工技术、整体壁板喷丸成形技术、整体壁板蠕变时效成形技术、超塑成形/扩散连接技术、化学铣切技术、搅拌摩擦焊接技术、高能束流焊接技术等。

(2) 复合材料结构制造技术。复合材料结构制造技术除在整体结构制造方面具有很大的优势外,在其他一些金属替代型部件制造方面也具有独特的优势,不仅可以减重,还可以提高性能。因此,复合材料用量越来越大,已经从 C-17 的 8% 提升到了 A400M 的 35%~40%。到目前,主要的复合材料制造工艺包括手工铺层、真空袋/高压固化(Vacuum Bagging/Autoclave)、压模成型(Compression Molding)、液体树

脂模塑成型(Liquid Resin Molding)、树脂转移模塑成型技术(RTM)、拉挤成型(Pultrusion)、纤维缠绕(Filament Winding)、注射模塑成型(Injection Molding)、热塑性加工(Thermoplastics Processing)、自动铺带(Automated Tape Laying)、自动铺丝等。在这些工艺中,传统的手工铺层技术逐渐被自动铺带、自动铺丝技术所取代,但是一些外形非常复杂或自动技术完成不了的工艺还保留着手工方式。另一方面,RTM、注模技术等液体树脂成型技术得到了较广泛的应用。

与其他军用运输机相比,A400M的复合材料用量已经明显提高,达到35%~40%,一些重要的主承力结构均采用了复合材料制造技术,像机翼翼梁、中央翼盒等。A400M的复合材料机翼开创了采用碳纤维复合材料制造运输机机翼的先河,其机翼翼盒长达23m,宽4m,重约3t,颇引业内瞩目。除了翼肋之外,A400M的机翼几乎全部用碳纤维增强塑料(Carbon Fibre Reinforced Plastic, CFRP)复合材料制成。中央翼盒采用的是碳纤维复合材料,减重效果达到50%。翼梁也采用全复合材料制成,前后梁均长19m,其中前梁由分别长7m和12m的内外段前梁连接

而成,后梁由分别长14m和5m的内外段后梁连接而成,主要采用了最新的自动化铺带机、双气囊成形工艺和高精密的Henri Line机床,能够保证误差在0.25mm以内。机翼蒙皮重约900kg,长约20m,几乎全部用碳纤维增强塑料制成。A400M的垂直和水平尾翼也是一种大型的碳纤维/环氧部件。A400M的副翼(5m×1m)和扰流板采用碳纤维和环氧树脂制造,并在高技术清洁室中经受可控环境条件的热处理和加压。在机身两侧的主起落架舱周边的每块整流板(长14m)是一种金属与复合材料的混合结构,其骨架采用金属制成,而面板则是玻璃/碳-碳合成复合材料,4个前起落架舱门由碳纤维夹芯结构制成,每个舱门重90kg。此外,A400M的翼-身整流板也采用碳复合材料制成。

(3) 轻质合金结构制造技术。金属结构仍是机体部件不可或缺的一种材料结构,因此,为了获得减重、提高性能以及降低成本等目标,钛合金结构以及铝结构的先进制造技术得到发展。美国空军材料与制造部已同工业部门合作,共同为C-17开发了发动机挂架上的薄壁铸造钛合金头罩(Nose Cap),从而简化了制造工艺,减轻了零件重量,使空军节省

大约320万美元费用。

A400M军用运输机机身“上壳体”(Top Shell)采用了先进铝合金结构锻造技术,采用专门的5轴和3轴机床对先进的铝合金锻造而成,约每6m²重100kg。为了做这项工作,南非丹尼尔公司已经投资制造了一种新型的长床身机床和特殊处理设备。此外,轻金属胶接结构也是一种典型的轻质合金结构制造技术,像铝合金蜂窝胶接结构,其在航空产品中最有效的应用领域是机翼和尾翼的增升装置、机翼和机身壁板以及发动机的相关部件等。伊尔-76飞机大量采用了胶接蜂窝结构,约有400m²左右的面积,主要的结构件如机翼后缘上下表面的壁板、襟翼、副翼、扰流板、减速板、主起落架舱门、方向舵调整片等。

(4) 自动化装配技术。军用运输机的自动化装配技术可以从3个方面来体现:翼梁自动装配、整体壁板自动钻铆以及机翼对接安装真空起重控制。自动翼梁装配工装(Automated Spar Assembly Tool, ASAT)的出现取消了对由人工操作的拆卸、去毛刺和清洗工作的需求,取消了龙门吊与手工过程,大大减少了对部件碰损的可能性,线性排列的装配型架可以使1台机器在多个工作站运转。整个紧固过程中装配型架对部件稳固的加紧作用可以使蒙皮和翼梁的精度确定过程取消,从而大大提升生产率。现在翼梁装配系统已发展到E5000(ASAT4),并在C-17中得到应用。

为了提高生产效率,1996年麦道军用运输机分公司在长滩工厂投资3700万美元采购5台新型自动化机床,用于小型蒙皮壁板与大型壁板的连接、机身蒙皮与机身框连接、装配机翼大梁、地板框及蒙皮的钻铆、舱门连接等。1998年,德国Brotje自动化公司和西班牙Torres工业公司开发的长90m的铆接机交付波音,



车间中的A400M机翼组件

它在装配过程中采用了机器人模拟软件,主要用于机身壁板的铆接。这台铆接机使生产率提高 10 倍,原来手工铆接是每 2min 铆接 1 个铆钉,而采用这台铆接机铆接速度可达每分钟 6~8 个铆钉。除了速度增加外,铆接质量也大大提高,减少了返工率。

此外,A400M 的生产也采用了一些自动化设备。在机翼安装过程中,为了满足创新的设计要求,A400M 装配采用了一些创新的生产工艺和工装方法,包括一种专门设计的真空起重系统(Vacuum Lifting System),可以把机翼整体悬吊在机身上方,自上而下慢慢置于安装位置,然后在 12 处连接点通过耳片和螺栓与机身固定连接。

(5) 精益制造技术。为了改善 C-17 服役性能、延续 C-17 服役时间,波音公司已将精益制造理念应用于 C-17 项目。在 C-17 精益制造项目中,波音公司采用的方法有:高能力工作组织团队、加速车间改进、跨职能团队集成、供应商计划、工作流程细化等。主要的精益制造项目包括:货舱坡道及舱门、主起落架舱装配、机头、发动机挂架、隔框、小型子装配部件、各种支撑部件等。其中,机头总装项目精益制造产生的效果为周期减少 60%,生产率提高 60%,制造时间减少 85%;前机轮精益制造产生的效果为订-交货时间减少 81%,制造时间减少 48%,周期减少 81%,人员走动减少 48%,所有安全问题得到解决。另外,在复合材料水平尾翼精益制造中,有 3 个目标:演示和验证改进的制造工艺,精练设计方法并验证益处,确保从开发到生产的无缝转换。最终飞机在 1998 年 12 月成功进行了静态测试,没有任何失败之处;在 1999 年 2 月,复合材料水平尾翼安装于生产型 C-17 飞机,1999 年 3 月成功完成飞行测试。复合材料水平尾翼精益制造使得水平尾翼减

重约 254kg,部件减少 81%,加工减少 69%。

(6) 数字化技术。波音在 C-17 的机身制造中采用了数字化技术,选用达索公司的 Deneb/IGRIP 数字制造解决方案,并将其用于“Brotje”铆接机,用来仿真该铆接机的所有运动和功能,包括加工工具的自动更换。它也被用来检查潜在的碰撞干涉。波音公司通过采用这种方法来缩短



C-17 飞机的生产时间,并减少生产中的错误。

空中客车公司则将 DELMIA V5 机器人数字化制造解决方案用于 A400M 制造。该解决方案是由达索系统公司和 IBM 公司联合开发,主要用于制造过程模拟、验证和规划机器人装配生产线。这一战略选择将使空中客车新机项目的设计和生时间减少、成本降低并加速新产品的问世。A400M 飞机是第一架完全采用 CATIA V5 设计并采用 DELMIA V5 进行模拟制造的飞机。该模拟工具拓展了数字化制造领域,能够提供 A400M 项目检查装配以及维修过程中各种飞机零件的可达性。

结束语

减重、低成本制造技术的发展需求越来越高。随着这种趋势的发展,

钛合金、复合材料在飞机上的用量越来越大,因为与铝结构相比,碳及钛材料更轻,约可以节省重量 20%~30%;另一方面,碳纤维结构部件不易损伤失效,而钛的耐腐蚀性更好。因此,未来钛金属结构制造技术以及复合材料结构制造技术将在大型军用运输机领域获得更快的发展。同时,因为钛金属比铝材料更贵,一些少切削、低成本的制造工艺将在钛合金结

构件制造中得到更充分的应用。如最近发展火热的熔模铸造技术,特别适合于加工钛合金这样的贵金属。缩减周期时间、减少能耗和提升材料利用率的制造技术将有更大的发展机遇,整体结构自动化制造技术将得到更快的发展。在复合材料结构制造方面,RFI、AFP 以及 RTM 等技术将成为今后几年内复合材料结构制造技术的主流。随着精益技术、数字技术的发展,大型运输机制造自动化、数字化程度将越来越高。如化学铣切技术、喷丸成形技术等都在发展配套数控系统,以实现工艺自动化控制,提高工艺精度和质量。总之,未来军用运输机制造技术将向轻金属/复合材料结构制造技术、低成本制造技术、自动化技术、数字化技术、精益化技术方向发展。

(责编 侧卫)