



C919 的制造技术热点 及最新研制进展

Hot Topic and the Latest Advances in Manufacturing Technology of C919

南京航空航天大学机电学院 姜丽萍



姜丽萍

研究员级高级工程师。现任中国商飞上海飞机制造有限公司总工程师、科技委主任、国家商用飞机制造工程研究技术中心(筹)主任,原任 ARJ21 新支线飞机项目总工程师、现任 C919 大型客机项目行政指挥并负责制造技术,全面负责飞机零部件制造、部件装配、总装集成和相关的制造技术工作。

C919 项目紧跟世界民机制造发展方向,通过与国外飞机生产线供应商的深入合作与交流,充分分析和学习国际先进制造技术及其装备的发展趋势,为 C919 技术追赶提供了方向和思路。C919 飞机在 ARJ21 飞机的技术基础上更进一步,在新材料、新工艺以及自动化装配领域大胆创新,开辟了全新的新机研制道路,系统地规划了 C919 飞机所涉及的关键技术,为实现数字化制造的目标付出了巨大努力。

大型民机也一直被誉为“现代制造业的一颗明珠”,是对一个国家机械、材料、冶金、工业制造等诸多行业的全面检验。研发民用飞机已成为提高国家核心竞争力的重要标志。目前,全球主要飞机市场被波音、空客公司所垄断,与这些企业配套的产业链不仅形成了发达的工业生产体系,同时也拥有先进的制造技术研发体系,在一代代飞机研制中发挥了重要作用。

现代民用飞机的发展呈现更安全、更经济、更舒适、更环保、寿命更长、研制周期更短的特点,对飞机制造技术提出了更高的要求。以波音 787 和空客 A380、A350 等为代表的新型民用飞机在研制中广泛使用先进自动化装备、新型工艺方法,在复合材料构件制造、大型整体金属零件加工,飞机精确装配等领域发挥了重要作用。

C919 项目紧跟世界民机制造发

展方向,通过与国外飞机生产线供应商的深入合作与交流,充分分析和学习国际先进制造技术及其装备的发展趋势,为 C919 技术追赶提供了方向和思路。C919 飞机在 ARJ21 飞机的技术基础上更进一步,在新材料、新工艺以及自动化装配领域大胆创新,开辟了全新的新机研制道路,系统地规划了 C919 飞机所涉及的关键技术,为实现数字化制造的目标付出了巨大努力。

民用飞机制造技术的发展

民机制造技术涉及范围广,通常的制造加工采用了常规的技术,但是,在民用飞机高性能、高可靠性、经济性等需求的驱动下,世界先进航空制造企业持续在民机制造领域对轻质材料的制造技术,自动化制造装配技术等领域进行投入,推动制造技术朝着更加精确、经济、稳定、高效的方向发展。

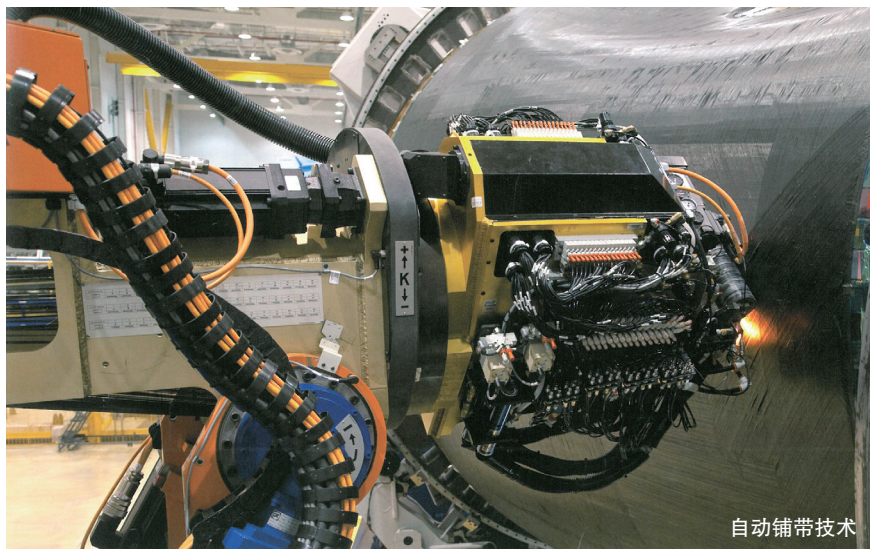
1 铝锂合金制造技术

第三代铝锂合金具有密度低、弹性模量高、比强度和比刚度高、疲劳性能好等诸多优异特性,是近年来航空航天材料中发展最为迅速的一种先进轻量化结构材料,用其代替常规的高强度铝合金可减轻结构质量,提高刚度。

新型铝锂合金已受到空客、波音等机体制造商的广泛关注,并在非承力结构件中进行了试探性应用。其中, A330 和 A340 每架飞机约有 3t 的铝锂合金用于机身结构、桁条等部件。随着新兴铝锂合金性能的不提高,已经由最初的次承力结构件向大型复杂的主承力结构件发展。由于铝锂合金的特性,其加工方法与传统方法略有区别,需对其展开适航审定的工艺验证,目前庞巴迪 C 系列、空客 A330 系列已经全面突破新型铝锂合金的制造技术。

2 复合材料制造技术

近 10 年来,复合材料在国外民用飞机上的应用得到了长足的发展。目



自动铺带技术

前国外民用飞机上复合材料应用,已经从尾部的次承力结构发展到机翼/机身主承力结构。如新近研制的空客 A380 客机的机翼、机身、中央翼盒结构都采用了先进复合材料,其用量已占结构重量的 25% 以上;波音 787 采用了机身桶段整体铺丝技术等先进制造技术,使飞机总体复合材料用量达到 50%; A350 则突破自动铺丝、铺带等装备和工艺技术,使总体用量达到 52%,成为在民用飞机上应用复合材料最多的机型。

3 飞机装配自动化生产线技术

先进飞机装配技术,已从单台自动钻铆系统向数控装配工装、模块化加工铆接单元、柔性定位系统、自动送料系统和数字化检测系统等组成的集

成化自动化装配生产线发展。在突破了零件精确制造、数字化装配协调技术,基于信息化的精确物料配送系统的基础上,实现了面向复杂构型的自动化柔性装配生产线。

自动化装配生产线包括自动化工装技术、加工和检测单元技术、数字化定位技术、离线编程与仿真系统等。自动化装配生产线包括了金属材料制孔工艺技术、自动化铆接技术、在线测量技术等综合技术。

C919 关键制造技术

我国民用飞机发展尚处于起步阶段,与欧美等国际领先企业相比,无论在设计理念、制造方法和装备上,还是在技术基础、科研设施、创新能力与核



自动化装配生产线

心技术的掌握程度等方面,都存在较大差距。

C919 飞机立项以来,在现有制造技术上进行了梳理,对新材料、新工艺带来的挑战,先后设立了 24 大项关键技术,同时在带动国内 9 家机体供应商开展了 47 项关键技术攻关工作。这些关键技术覆盖了机翼厚壁板复杂结构金属喷丸成形技术、环保表面处理技术、铝锂合金加工技术、主承力结构件的复合材料制造技术、复合材料无损检测及修补技术、数字化工艺技术、自动化装配技术等技术领域,从整体上带动了民机制造产业的技术提升,同时也为合理确定 C919 制造方案提供了支持。

C919 在机身结构中选用了铝锂合金、T800 级复合材料等新材料,在其制造方法中铝锂合金所涉及热处理、成形、干涉铆接技术;复合材料涉及的加筋壁板制造技术、无损检测技术、结构件修补技术等工艺方法需要得到验证以满足适航的要求。此外,对于诸如机翼整体壁板喷丸成形技术而言,由于厚度、尺寸等参数与 ARJ21 飞机有较大变化,且成形工艺方法唯一,也被列为关键技术之一;再次,要实现 C919 的量产和商业成果,需要对飞机生产线进行设计,对生产线中自动化装配技术的应用提出了挑战。

5 年来,从技术基础开始,伴随项目的推进以及配套设施设备的引进,工程设计的逐步成熟,上飞公司以及国内机体供应商共同开展了大量攻关工作,取得了一系列成果,为 C919 飞机的研制提供了支撑。以下是 C919 攻关工作的几个典型案例。

1 C919 铝锂合金制造技术

铝锂合金也是我国 C919 大型客机选材中的显著特色之一,并在机身结构中首次使用。铝锂合金机身结构制造工艺涉及钣金、热处理、机加、连接及表面防护技术。然而我国对于全新的第三代铝锂合金尚无经验可循,如何系统全面地掌握铝锂合金制

造工艺,是 C919 客机型号研制成功的关键之一。

(1) 铝锂合金精密热处理技术。

铝-锂合金的主要优点是密度低、比模量高。但是,铝锂合金这些性能的实现不仅是原材料冶金成分和轧制工艺,后期预拉伸和人工时效工艺也至关重要。以铝锂合金结构件承力状态为依据,开展了铝锂合金基于强度的时效工艺和基于损伤容限的时效工艺的工艺验证,掌握新型铝锂合金热处理过程中元素扩散规律,有效控制沉淀强化相的析出,获得满足强度和损伤要求的工艺。

(2) 数控蒙皮铣切技术。

用机械铣切代替传统化铣工艺是 C919 客机工艺上的显著特色之一,根据 C919 客机设计要求,在机身蒙皮结构中采用机械铣切技术,为蒙皮铣切工艺研究顺利进行,实现机械铣切向生产应用的过渡,并确定用于生产的工艺参数,设计制造了蒙皮铣切真空吸附平台。然而第三代铝锂合金切削加工工艺尚未有经验可循,且蒙皮多为薄壁结构,刚性差,加工容易出现缺陷。为解决铝锂合金机械加工工艺,开展技术攻关,通过对切削力、切削温度、表面粗糙度等要素的检测考察了材料的机械加工性能。结果表明,现有工艺参数可以满足切削加工要求,并完成工艺规范编制,目前正在开展适航工艺验证试验工作。

(3) 环保型表面防护技术。

传统的表面处理工艺历来是高污染、高能耗,在表面处理实施过程中排放出大量污染环境的废物。国内大部分的前处理液和表面处理溶液还是处于含毒害物、排放量大、污染严重的现状。在大型客机绿色环保的需求下,结合新型结构材料开展了新型铝锂合金新型阳极化工艺的研究。

环保型表面防护技术针对 2060T8E30、2198 合金新型阳极化、化学氧化两种表面处理工艺实验室阶段基础实验,并进行了工艺参数优化。在此基础上开展中试和生产线试验。目前该工作已全面完成,并实现了铝锂合金与常规铝合金虽不同时下槽,但可同槽处理的新工艺方法。这一工艺的获得不仅解决了铝锂合金表面防护问题,更避免了为铝锂合金生产而重建生产线难题,简化了生产工艺。

通过新型铝锂合金制造技术的研究,完成了新型铝锂合金制造工艺体系,突破了铝锂合金制造关键技术,解决了新型铝锂合金表面处理、化学铣切与传统铝合金的溶液兼容问题,实现了新型铝锂合金机身蒙皮结构件的高效、精准成形,完成了此类零件的工艺经验积累和技术数据采集,形成了铝锂合金钣金成形(滚弯、热压制下陷、蒙皮拉伸成形)、表面处理(铬酸阳极化、新型阳极化、化学转化)、化学铣切等系列工艺规范,并在西飞、洪都等



机身壁板试验件



机体供应商进行了推广应用,为大型客机的顺利研制提供了技术保障。

2 复合材料制造技术

C919 飞机在平尾、垂尾、后机身、后压力球面框等结构上使用了复合材料,较 ARJ21 飞机有了较大提升。复合材料制造技术在国内已有一定的应用基础,但尚未在民用飞机的主承力构件中使用,未形成稳定的、满足适航验证要求的制造工艺。C919 项目针对这一短板,通过复材构件制造、检测、装配这一主线过程,梳理制造关键技术,分别攻关,形成民用飞机复合材料承力构件研制能力。目前已经开展的复合材料关键制造技术有以下几个方面。

(1) 大尺寸变厚度加筋壁板制造技术。

C919 大型客机中复合材料用量占机体总重量的 15%,其中大部分为加筋壁板结构。民用飞机壁板部件尺寸大,厚度变化大,需要与细长长桁共胶接,制造过程中会产生比较严重的变形问题及孔隙率问题;平尾、垂尾、后机身均为加筋壁板共固化结构,国内之前还没有进行过如此大尺寸的共固化加筋壁板结构制造,制造过程中有可能产生共固化定位不准、脱模困难等问题;后压力球皮结构的无皱褶铺贴也为新工艺,可能产生较大的表

面褶皱,筋条在球皮上的定位也有较大难度。

通过 C919 客机复合材料结构件制造技术研究,针对复合材料固化变形基础技术,开展了复合材料固化变形及残余应力控制技术,对整体成型工艺过程的数值模拟可预测整个工艺过程的温度场及固化度场的分布情况,成功预测构件的固化变形情况;针对自动铺带工艺,开展自动铺带的工艺窗口技术研究,突破了复杂曲面铺贴工艺参数,及其对产品性能影响的控制技术,为自动铺带技术在民用飞机大尺寸结构件的应用奠定了基础。

(2) 复合材料整体共固化制造技术。

大型整体结构件可以利用复合材料制造的特点,采用共固化技术,减少紧固件数量甚至是不使用紧固件,是民用飞机复合材料构件制造的发展

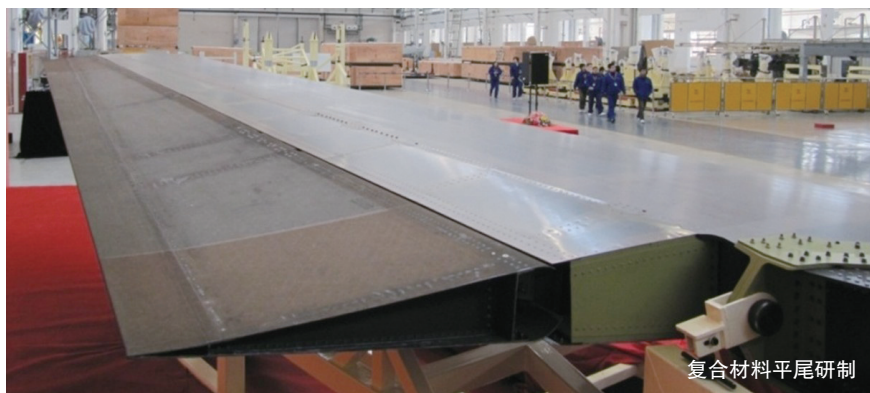
趋势,在 C919 平尾壁板制造中采用该工艺技术。复合材料整体共固化工艺主要技术难点在于其工艺方案如何实现内部结构加压,模具设计方案如何实现共固化组件之间相互定位精度,以及如何使内部组件的预先成型,具有一定的刚度进行共固化之前的预组装。通过技术攻关,解决了子母真空袋封装技术,以及模具设计制造技术,实现了平尾复合材料整体壁板的共固化成型技术的应用。

(3) 复合材料孔隙率的检测复合材料结构孔隙含量的超声评估技术。

孔隙率的出现复合材料中不可避免,一般不同的部位对孔隙率的要求也不一样,作为飞机的主承力结构件,对孔隙率的控制非常严格,一般不能高于 1.0%~1.5%;对于次承力结构件,一般要求孔隙率低于 1.5%~2.0%。普通分层、夹杂、气孔等缺陷的检测与评估相对来说较为成熟,但是孔隙率这类微观缺陷的检测与评估技术至今仍是复合材料无损检测公认的技术难题。

通过对比试块法,针对 C919 所使用碳纤维复合材料,制造出一系列不同厚度、不同孔隙率阶梯的标准试块,再通过采集超声底波衰减信号,以建立评估曲线,实现对孔隙率的评估。目前,前期的对比试块的验证试验已经完成,目前正在开展标准编制的相关工作。

通过上述基础技术与部件制造技术的攻关,结合试验件的制造过程,充分验证了复合材料结构设计与制造工



艺可行性。并以此为基础,完成了30余份复合材料工艺规范的编制,打通了C919复合材料零件制造的技术路线,为机体供应商能够生产出满足设计要求的合格首件提供了技术保障。

3 自动化装配工艺技术

飞机装配技术是飞机生产的龙头,C919飞机装配技术着眼于未来批生产的模式,以实现飞机自动化装配生产线为目标,先后开展了数字化工艺设计与仿真技术、自动化装配技术以及自动化定位技术等攻关工作,拟解决C919飞机生产中所涉及的装配质量稳定、装配效率提升等问题。

针对C919飞机所选用的新材料、和新的自动化加工装备,展开装配工艺技术的研究,对铝锂合金、复合材料装配连接工艺,柔性自动化定位技术、数字化装配仿真技术等展开研究,打通数字化仿真平台,建立满足长寿命要求的制孔、干涉铆接等工艺规范,制定自动化装备的应用标准,为引进自动化生产线奠定基础。在装配技术领域,目前已开展的主要飞机装配技术有以下几个方面。

(1) 数字量装配工艺设计与仿真技术。

对MBD数字化工艺设计技术进行研究,建立了符合我国大型客机研制的数字化工艺设计方法,实现基于单一产品数据源的在线数字化工艺设计平台。建立了基于数字化工艺设计与仿真软件的工艺编辑器,装配偏差仿真分析与容差分配设计工具,引入生产线设计评估分析系统,建立装配仿真、生产线仿真评估体系,构建了面向三维数字化工艺设计应用的一体化集成研制环境。

利用所定制的MBD工艺设计环境,开展虚拟装配仿真的集成应用工作,编制了C919装配仿真评估手册,实现虚拟制造环境下的三维数字化装配工艺设计和装配过程仿真,将设计的工艺和仿真的结果用于车间现场真实的产品装配,实现现场的可视化信

息的传递,并成为工人进行技术培训的多媒体资料,以及在生产现场指导工人工作的技术依据。通过定制现场可视化终端的设备和设施,用于现场装配操作人员的培训学习和即时操作指导,可以更直观地了解产品的装配属性,理解产品的装配工艺和工艺流程,减少了看二维图纸和理解工艺规范的时间,并且很大程度地消除了歧义,提高了工人工作的准确度和效率。

将生产线产能评估与仿真分析技术纳入到生产线设计工作中,开展工艺流程仿真评估工作,确保生产线的效率。上飞公司的C919客机五条生产线研发过程中,通过产能评估与优化设计,推动了生产流程设计及作业标准化进程,实现均衡生产,保证设备、人力的负荷平衡,同时也有利于在后续生产中建立正常的生产秩序和管理秩序,保证产品质量和安全生产。

(2) 自动化装配技术。

机体结构系统日益复杂,结构寿命要求不断提高,部件或机身连接的精密装配要求尤为凸显。C919项目针对自动化生产和高精度装配质量的要求,开展了自动化装配技术研究,全面采用柔性化、自动化精密钻铆装配技术,验证了铝锂合金自动钻铆工艺、复合材料装配工艺、干涉铆接工艺等技术,扩大了连接工艺规范的技术范

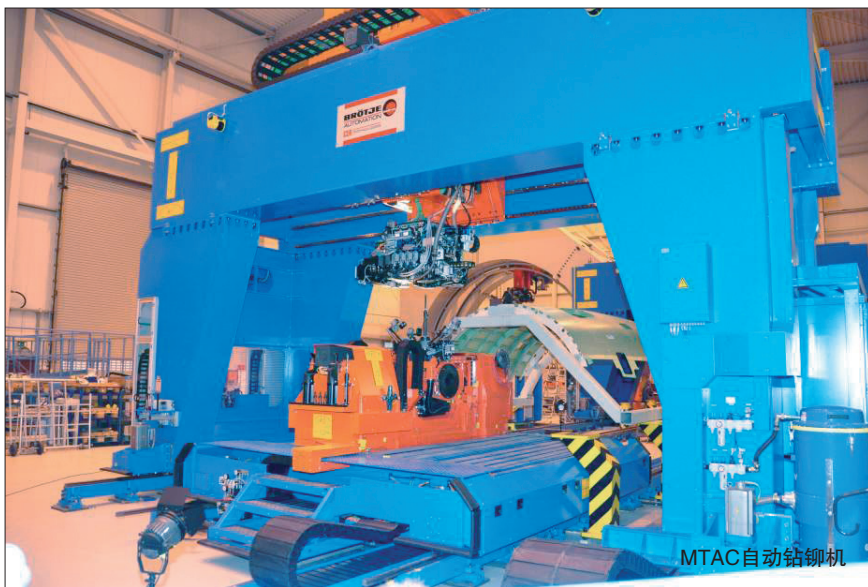
围,提升了长寿命制造的工艺能力。

在自动化装配领域,主要开展了金属无毛刺制孔、长寿命连接自动钻铆系统及工艺技术、复合材料自动化制孔、连接与装配工艺技术研究。分析了自动化制孔、铆接等装备的关键工艺因素对金属制孔毛刺、复材制孔劈裂、金属结构铆接干涉量大小及均匀性的影响规律。总结了自动装配装备的稳定工艺参数表,并形成工艺规范10余篇,覆盖了C919所涉及的自动化装配工艺,确定了C919自动装配工艺控制方法,并开展了相关制造厂的特种工艺验证工作。

(3) 大部件自动定位对接技术。

飞机大部件对接数字化装配技术将传统的依靠手工或专用型架夹具的装配方式转变为数字化的自动对接装配方式,将传统装配模式下的模拟量传递模式转变为数字量传递模式,提升了装配精度和效率。C919全机对接生产线设计采用自动定位对接系统。

针对大型客机自动化对接的需求,采用产学研结合的模式,开展了民用飞机大部件自动对接技术研究,突破了自动对接工艺流程规划、柔性定位机构设计与控制与大空间多运动目标智能测量技术等6项关键技术,建立了国内首套自动对接系统,实现了





自主研发的自动化定位系统

ARJ21 飞机 106、107 架次的工程化应用。为 C919 全机对接生产线建设提供了技术支持。

(4) 数字化装配生产线技术。

根据 C919 批生产的需求,联合国外生产线供应商,规划和设计了中机

身、中央翼、平尾、全机对接以及系统总装移动生产线等 5 条生产线。生产线以实现 C919 客机部装自动化、数字化、柔性化为任务,充分考虑柔性、兼容及可扩展性,可适应 C919 不同机型的装配、对接需求。引入了机身壁板

自动钻铆设备、虚拟五轴自动制孔设备、壁板类自动装配设备、机身/翼身自动对接设备等,实现了部件装配/对接自动化测量、定位及数字化制造协调和检测等综合技术的应用集成,实现对飞机生产线设计的突破。

结论与展望

5 年来, C919 型号开展了大量的工艺试验和攻关工作,为型号研制、民机制造技术基础积累了大量的数据和方法,摸索出一条符合我国民机产业发展的技术路线,构建了一批技术平台,编制了一套满足适航要求的工艺规范体系,为 C919 型号有序可控生产奠定了基础。同时通过关键技术攻关,带动了装备制造、产品质量提升。

在研制过程中还暴露出各种新型材料的制造技术基础还不够完备,部分技术成熟度不够高的问题。在新型轻质材料的工艺材料性能方面基础还较为薄弱。商用飞机制造可选用的材料众多,性能差异大,所需要的制造技术范围广泛,同时所有应用到飞机上的技术必须经过苛刻的验证以保证其安全性。因此工程中心要针对此类问题,加大工艺材料性能研究,一方面优化工艺研发技术,减少实验,缩短类似技术问题的研发周期;另一方面需要拓宽研究开发的范围,增加基础工艺的能力。

未来民用飞机将突出长寿命、低成本、高可靠性等指标,先进复合材料、钛合金以及新型轻质合金等新材料将被广泛应用,需要新型可靠的零件加工工艺、自动化装配工艺和检测技术来保障飞机的研制,同时,结合 C919 工作的进一步发展需求,未来还将在以下几个方面加强科技投入:复合材料整体机身/机翼结构自动化制造技术,双光束激光焊接工程化应用技术,弱刚性部件低应力装配与质量控制技术,智能自动化柔性装配技术,实现制造技术的提升。

(责编 深蓝)