

却顾所来径，苍苍横翠微

——国产大型客机 C919 复合材料发展侧记

文 / 杨洋（上海飞机制造有限公司）

2017 年 5 月 5 日，在全国人民的关注和喝彩声中，浦东国际机场一架国产大型喷气式客机完成了首次成功起降，中国民用航空随之也开启了新的篇章。中国人设计、制造的现代大型客机终于在 37 年后重回广袤的蓝天！同样是上海，从 1980 年“运 10”的首飞到 2017 年 C919 的首飞，凝结了所有民机人的艰辛、执着、奋起与喜悦，体现了“永不放弃”的信念与责任。

在国际民用飞机大量采用碳纤维复合材料的背景下，为提高飞机的先进性、环保性，C919 设计方案中采用了 12% 的先进复合材料，针对后继机型规划了复合材料中央翼及外翼的技术储备工作。然而，在立项之初，国内缺乏设计和生产大型复合材料零件的经验，更是缺乏成熟的相关自动化设备。同时所有复合材料零件及其生产过程必须满足与美国 FAA 适航标准相似的规范要求，这使得工作变得愈发艰难。与之对应的是相关技术团队无与伦比的艰辛付出。然而正是 C919 的研制，极大地提升了复合材料设计、制造水平及标准，也带动了一批相关产业的发展。回味 C919 首飞的情景，



上飞公司陈列的国产“运 10”飞机和“永不放弃”石碑



C919 大型喷气式客机

意味也更加深长。

一、C919 复合材料使用情况

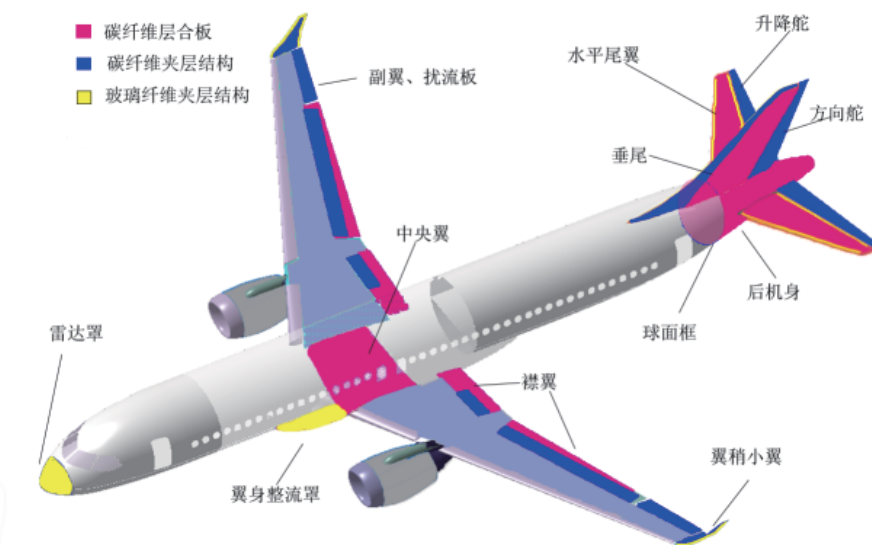
国产大型喷气式客机 C919 的碳纤维复合材料用量约为 12%（飞机结构重量），部件为水平尾翼、垂直尾翼、翼梢小翼、后机身（分为前段和后段）、雷达罩、副翼、扰流板和翼身整流罩等。

虽然国外的先进客机 A350、B787 等复合材料用量已经达到 50% 以上（C919 的竞争机型为 A320、B737），但如此大规模的采用碳纤维复合材料，国内尚属首次。上述零件中，有大尺寸复合材料壁板结构（水平尾翼、垂直尾翼）、蜂窝三明治夹层结构（活动面）、大曲率变截面（后机身）等复杂结构，加之尺寸很大，使得制造难度增加。

二、艰难前行

C919 的机体结构立足于国内自主生产，研制之路充满挑战与艰辛。大飞机研制之前，国内各大飞机制造公司没有大型复合材料零件生产的自动化设备，如预浸料自动铺带机、热隔膜成型机、大型无损检测设备及标准、大型热压罐等等。复合材料的铺贴一般采用人工手铺，稍微大一点的零件即需要几个班组加班加点，制造效率低，产品重复性也差。

面对这种情况，国内航空制造企业有计划地采购国外成熟的制造设备，为大型复合材料的研制提供保障。几年间诸如预浸料自动铺带机、自动铺丝机等先进设备陆续安装调试并投入使用。面对设备采购的种种波折和工艺调试的艰辛工作，只能想办法、拼时间，一一克服。至此，中国具有了可以快速、稳定铺放大尺寸复合材



料的国际顶尖的设备和能力。另外，诸如复合材料热隔膜成型设备、复合材料超声波裁断机、大型水切割设备、大型 C 扫描等先进自动化设备也成为了国内复合材料零件供应商的生产装备。

另外的技术难点是复合材料制造的工艺标准和检验标准。由于复合材料零件分散在多个国内供应商生产，为使其具有较高的一致性和可靠性，必须编制一套科学的复合材料生产工艺规范。为了编制这套规范，技术团队在借鉴有限资料的基础上，针对 C919 的选材种类和工艺特点开展了系统性的工艺验证实验，分别针对复合材料板材、夹层结构、多次固化、胶接工艺等几十种工艺、辅助材料进行了验证、评估，并结合技术攻关、试生产及零件制造失败案例对工艺规范进行持续的改进和升版。可以说，工艺规范体系是 C919 复合材料制造的核心技术，也是保证复合材料零件符合适航标准的有力工具。

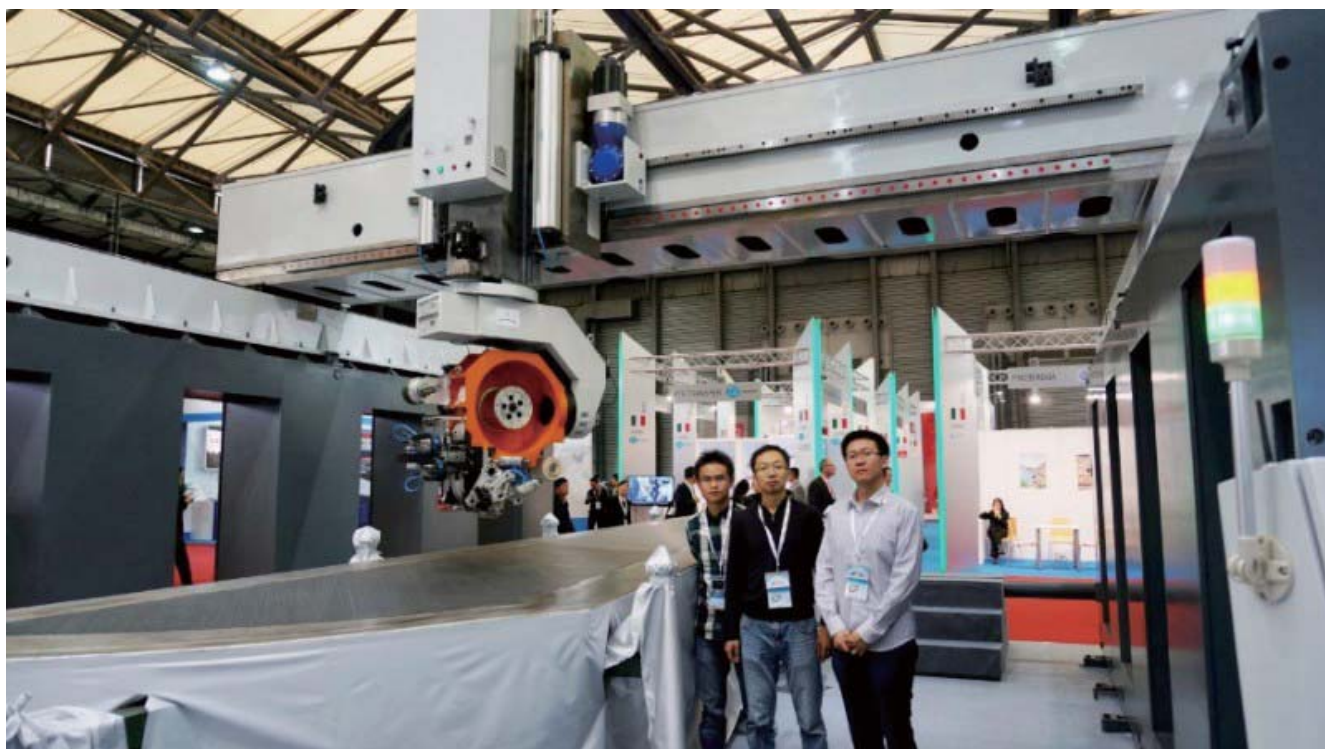
C919 选用了多种不同的复合材料体系，必须针对每一种体系建立无损检测标准。一般采用超声波 C 扫描的

方法进行检测。由于无损检测标准为波音等国外公司的商业秘密，无法借鉴，C919 的无损检测标准只能自力更生研制。通过对几万块复合材料试块的制造和研究，中国商飞获得了自己的复合材料孔隙率标准。而这仅是一种材料，C919 复合材料共有 4 个体系，其工作量可想而知。复合材料无损检测标准的建立使得复合材料零件的质量有了安全保障，后期的全机强度实验也验证了这套标准的可靠性。

除此之外，复合材料高精度加工、装配和修理维护技术的攻关和技术体系的建立不仅仅服务了 C919 的型号研制，也带动了国内复合材料设计、制造行业技术的前进和升级。更重要的是，通过型号研制，培养了一批技术精湛、熟悉适航条款、爱岗敬业的技术队伍，中国的民机产业借助这些技术人员和不断升级的制造装备，必能在世界民机舞台上有所作为！

三、带动与引领

C919 复合材料结构件的研制不仅保证了型号的研制，也积累了大量的经验和成果。在复合材料结构件的研



复合材料国产自动铺放设备参展 2014 上海国际工业展览会

制过程中，中国商飞还瞄准后续机型，开展了复合材料中央翼、复合材料机翼的预先研究工作，这使得国产复合材料结构件开始从目前的次承力结构逐步转向主承力结构件，这也是航空领域复合材料的最高水平。

同时，在低成本制造领域，也取得了一些成果，填补了国内空白。如先进的整体共固化技术、液体成型技术、热塑性复合材料原位成型技术等，这些预先研究也是国内外复合材料制造的研究、应用热点，通过上述工作，逐步缩小与国际的差距，并力争有朝一日实现在国内民机制造上的应用，进一步提高飞机的竞争性、降低全寿命成本。

在特定产业带动方面，也有所作为，诸如国产碳纤维原材料验证、工艺验证、国产预浸料自动铺放设备的研制、民营零件供应商的评估与扶持、国产辅助材料工艺评估等方面也取得了效果。相信在不远的未来，C919 复合材料全产业链的国产化率会越来越高，并将辐射到整个复合材料行业。

四、更艰巨的挑战

前进没有止境，复合材料的发展也永不停息。C919 系列飞机的复合材料比例会逐渐提高，对设计、工艺也会不断提出新的要求。同时，中俄联合研制的宽体客机的复合材料用量预计超过 50%，将会出现复合材料机翼、

复合材料机身的使用。这意味着更加艰巨的挑战，我们必须清晰认识与国际一流水平的差距，奋起直追，对现有成果、经验乃至教训进行全面的总结并付出加倍的努力！

C919 首飞成功必将被载入中国民航发展的史册，但这只是万里长征的第一步。从首飞成功到适航取证，再到商业成功，要做的工作还有很多，路很长。在打造中国民机产业和品牌成功的道路上必定有很多艰难险阻，这需要我们“永不放弃”精神坚持到底，希望有更多的中国大飞机翱翔蓝天！