

复合材料制造自动化技术发展

Development of Automation Technology for Composites Manufacturing

中国航空工业集团公司科技与信息化部 郝建伟



郝建伟

高级工程师,毕业于北京航空航天大学高分子材料专业,硕士学位。长期从事航空先进材料科研管理工作,在航空复合材料制造技术方面具有丰富的科研管理经验和专业知识。发表过多篇论文。

复合材料自动化制造的大规模实施,可以显著降低复合材料结构件的制造成本,采用一体化模压成型以及铺带、自动化检验尚有大的发展空间。因此采用自动化批量生产工艺,是促进复合材料产品降低成本、得到更广泛应用的必由之路。

自动化及大批量生产工艺。根据国外2005年的统计,在复合材料制造工艺中手工占20%,自动纤维铺放只占17%,因此采用一体化模压成型以及铺带、丝束铺放自动化检验尚有很大的发展空间。自动铺丝、自动铺带以及自动模压成型等大批量生产工艺,是促进复合材料产品降低成本、进入市场的必由之路。

自动铺层技术及设备

2007年大型民机复合材料结构中只有43%是用自动化技术制造的,预计10年内将达到64%。自动铺带及丝束铺放的材料利用率能达到80%~97%,而手工铺层的材料利

用率仅为40%。复合材料制造自动化包括铺放、编织、缝纫、检验等多个方面,其中自动铺放技术是军民用飞机生产自动化技术中发展最为迅猛的部分。在自动铺带领域,目前铺带宽度最大可达到300mm,铺带速度达1.3~20.4kg/h,生产效率可达到手工铺叠的数十倍;丝束铺放技术适于大曲率机身和复杂曲面成型,目前铺丝速度可达6.8~11.3kg/h,最高可达23kg/h,最新的Viper6000系统可以铺放并控制32个纤维束,每束宽3.2mm,以前的机器为24个丝束,从而使铺层带宽从7.6cm增到10.2cm。铺放速度达到30m/min,精度为 ± 1.3 mm。

从复合材料的价值链来看,原材料的附加值为30%,而结构件制造的附加值占55%,预浸料等中间产品占10%。第一项及第三项成本具有相对稳定性,降低结构件的制造成本是关键,而目前有效的方法是采用自

从自动铺带及纤维铺放来看,目前全球有 100 多台设备。辛辛那提公司近日又推出 2 种设备,一种是 69Charger 铺带机,一种是 49 纤维铺放机,两者均体现了铺层机上革命性的变化。

1 辛辛那提公司的自动铺层技术及设备

自动铺带机是在 20 世纪 60 年代初无纬布预浸带出现后几年、为加速铺层的工艺过程而开发的。早期的铺带机都是由本国开发的,在美国,第一台电子计算机控制的龙门式铺带机就是根据美空军材料实验室计划由通用动力公司与 Conrac 公司合作开发的。此后又大量开发了用于大型复合材料结构的自动铺带机及纤维铺放机。

第一代铺带机及其以后出现的纤维铺放机是由一些传统的计算机数控机床制造商开发的,它们自面世起就与飞机复合材料制造业密切合作。其中马格·辛辛那提就是继承了辛辛那提米拉克龙公司,其他类似的公司还有 Ingersoll 机床工具公司、Forest-Line 以及 MTorres 公司。

在铺带机方面,马格·辛辛那提提供了品牌 Charger 型机,可以铺 75mm、150mm 或 300mm 无纬预浸带。Charger 型面铺带机可以铺达 25° 锐角的特型铺层,它应用的是 CNC 十轴龙门型系统,可自动下料、压实预浸带。该系统应用了独特的侧面加载头,可提供快速、简单更换 300mm 宽、650mm 直径铺放压辊功能。空客及欧洲合作伙伴曾购买 10 台铺带机用于生产 A320/330/340/380 及 A400M 的机翼桁条、梁、蒙皮及升降舵、尾翼蒙皮、平尾、发动机短舱、机身蒙皮及机腹整流罩等。

除了通用的铺带机外,马格·辛辛那提还开发出形状相同或相似的大批量生产的专用铺带机,如为沃特飞机公司开发了平面铺带机,用于制造长而平面的构件,该机有

18.5m 长的平面钢制真空台以及用伺服系统从一端到另一端运输的机构,铺带速度达 30.48 m/s、22.7~27.2kg/h,精度 ±0.75mm,启动停车精度 ±0.75mm。

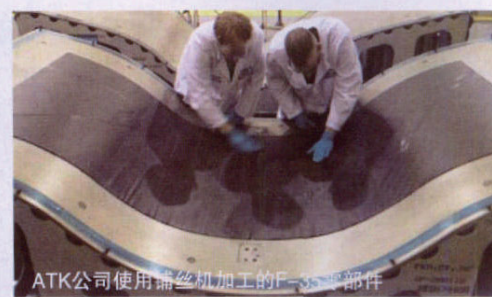
后续该公司还开发了小型平面铺带机(SFTL),用于生产长、窄、平面构件,多件铺层和板、隔膜成型蒙皮等,典型用途有大梁、桁条、梁、剪切带、框、襟翼及蒙皮。它还提供长、窄的结构件,特别适用于飞机用的复合材料桁条、大梁及梁。这种机器可用于宽 300mm 的预浸带,其特点是铺带头能力高、运载结构及支承结构能量大,既可铺无纬带,也可铺织物。

在纤维铺放方面,马格·辛辛那提提供了品牌 Viper 的 49 Charger 铺放机,其中最新的型号是 Viper6000,能操作达 86180kg 的心轴,可对 32 条丝束或窄带进行供料、夹持、下料及铺放。目前,沃特飞机公司用来生产波音 787 的机身段,空客订购 6 台 Viper6000 用于 A350XWB 的机身制造,机身的 92% 将用 Viper 制造。

在目前全球 100 多台复合材料部件生产的机器中将增加 2 种设备:一是 69Charger 铺带机和 49 纤维铺放机(Viper)。二者体现了在机床上的一些革命。它们将飞机专业公司推向世界的领导地位。该公司已为代表航空未来的机床制造的创新途径制定了“规范”。

随着空客及波音等制造商铝合金使用量的减少,生产复合材料零部件的机器便有机会走向前台。在马格公司 Hebron 厂的张贴画上展示了用公司生产的机器制造的飞机型材。铺带机始于 B-2 轰炸机。Viper 铺放机有 4 种类型,生产更复杂的曲线及角形零件,如机身、短舱及尾锥。

铺带机及纤维铺放机正用来制



ATK公司使用铺带机加工的F-35零部件



空客订购的辛辛那提Viper6000铺带机用于A350机身加工

造 18 种飞机零件,被 29 家公司所采用,波音有 24 台 Charger、3 台 Viper,空客有 7 台 Charger、10 台 Viper。

Viper 纤维铺放系统是公司在复合材料领域内的珍宝。它用先进的计算机控制器完成铺带及纤维缠绕,可生产不同厚度、高度特型的结构,废料低到 2%。

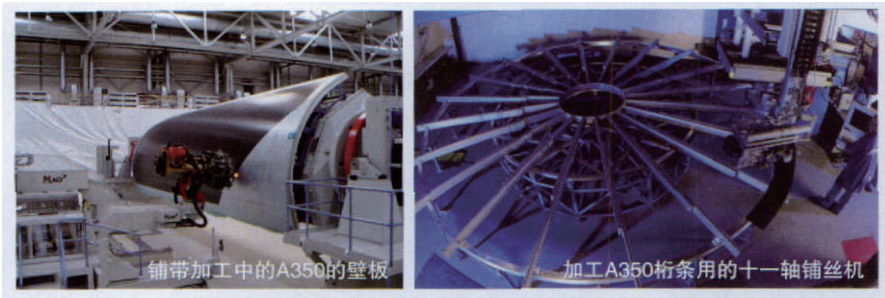
马格·辛辛那提公司的首个 Viper 产品是霍克比奇公司的首相 1 号公务机。复合材料比铝轻 20%,但重要的优点是简单,首相 1 号的前机身由 3000 个零件组成,现在则由两部分组成。

几十年前,关注的重点是用这种设备能否制出产品,后来转为能否制出合格产品,目前则转化为低成本的合格产品。

2 其他公司自动铺层技术及设备

除辛辛那提公司外,Ingersoll 及 MTorres 公司等近年来在航空复合材料自动铺层技术及设备开发上也成果倍出。

首先,Ingersoll 机器工具公司宣称已完成了 A350XWB 龙骨制造设备的方案论证,龙骨结构长 18m、最大厚度 0.12mm,最大半径 5.2m,该机器为 Mongoose V3 立式纤维铺放机,



可铺 32 条 6.25mm 的丝束。

其次,西班牙 MTorres 公司的自动铺带机也有长期的开发历史,A350XWB 将采用“TORRESLAYUP”十一轴的龙门式高速铺带机,可铺 300mm、150mm 和 75mm 的宽带,铺带头内装有预浸带缺陷检测系统。该公司的自动铺带设备在 A400M 机翼生产中也发挥了重要作用。自动化设备的应用在加快效率的同时,降低了废料率,A400M 翼梁采用自动铺带后,铺放效率比手工快了 40 倍,A400M 的翼梁采用自动铺带后孔隙率降低到 1%~1.5% (小于 4% 为合格),14m 长的翼梁精度保持在 0.5mm 内,相应的金属件精度在 300mm 内。但国外认为,丝束铺放是对自动铺带技术的补充,后者虽在生产大型平坦件时的性能极佳,但在加工高度复杂构件时易产生纤维屈曲;前者虽不如后者那样能快速铺出大面积,但能精确铺出更极端的曲线及方向变化。GKN 公司正在评估这种技术用于要求更高的翼梁、发动机的混杂构件以及消音衬里。为发展铺丝技术,而为复合材料翼梁专门设计的 MTorres AFP 机已在 2010 年交货。

为提高效率,除了采用通用的自动化铺层设备外,一个发展趋势是采用专用定制的铺层设备,如桁条、梁结构件等专用的铺层设备。在该方面,美国 CG 技术公司介绍了自动纤维铺放机的编程及模拟软件。现行的自动铺放机的脱机编程软件都是由自动铺放机制造商提供的,飞机制造商被迫使用这种专用的软件,这

与 20 世纪 50~60 年代的金属切削用 CNC 机床的情况一样。CG 技术公司的创新则是开发与机器无关的编程及模拟软件,即 VCP 和 VCS。该公司开发的 Electroimpact 多机 AFP 单元,有铺放头更换器,高速运转,可制造整体飞机机身筒体,目前正在用户的工厂中装配。

热塑性复合材料自动化成型技术及自动化设备配套

1 自动化成型技术

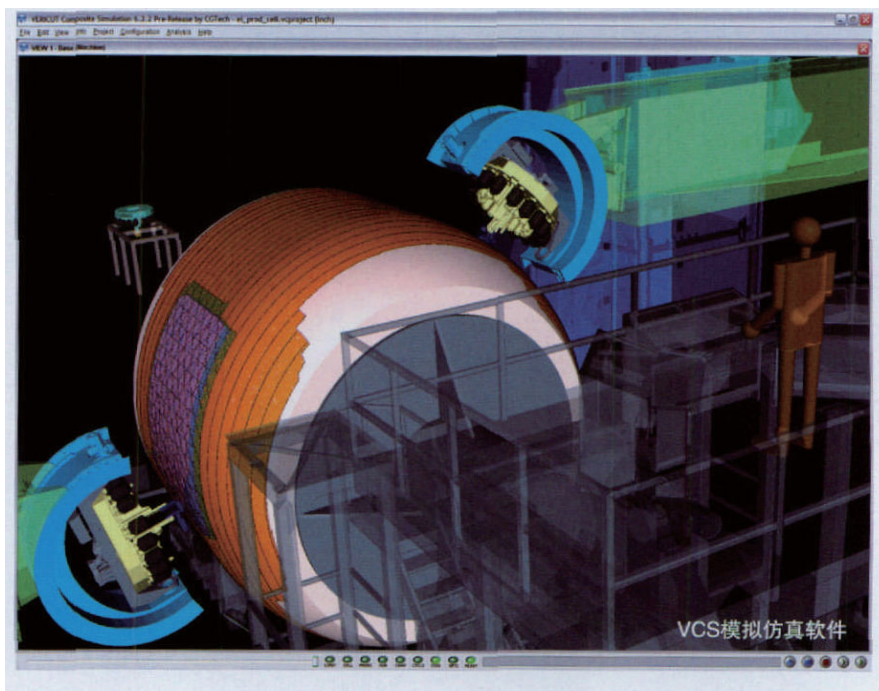
一体化热成型法批量生产热塑性复合材料零件是未来又一发展趋势。未来的飞机为了节能和减少 CO₂ 排放,将采用轻重量结构,热塑性碳纤维增强复合材料将在此发挥越来越重要的作用。目前的障碍是缺少经济、快速、可靠的零件制造工艺。例如聚苯硫醚(PPS)、聚醚胺

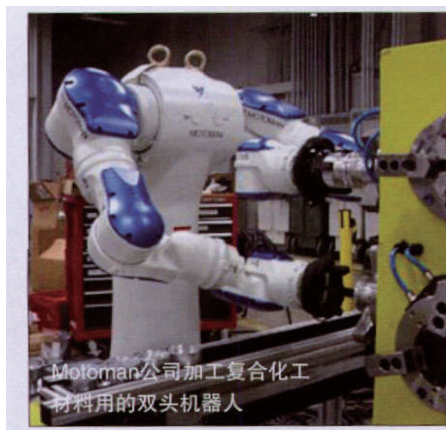
(PEI) 及聚醚醚酮(PEEK) 已被波音、空客经过认证,并用于飞机结构,尽管如此,热塑性复合材料的应用依然不多,只用在空客的 A340-600 和 A380 机翼前缘(J 形鼻)、龙骨梁或副翼,原因是目前的热成型法的效率不高。

为此,德国的不来梅纤维所、施塔德复合材料技术中心以及不来梅大学生产工程系开发了高度自动化热塑性 CFRP/GFRP 的制造单元。目前的热成型工艺不包括无损检验、型面切削和打标记,因此零件生产成本非常高,因为这些工艺不是组合在一起的。而自动化热成型工艺的目标是将工艺各个步骤组合在一起,以保证周期为 1min。其中一个关键要素是用超声试验以及数字成像分析法检验,检验的对象是孔穴、分层、纤维取向、结晶度以及几何形状。

除以上创新点外,在热塑性复合材料成型方面德国弗劳恩荷夫生产技术所开发了用激光辅助铺热塑性复合材料预浸料的自动化技术生产承力结构的能力。这一技术是在红外、微波以及激光辅助缠绕技术的基础上进一步开发的。

此外,由于航空制造是多品种、





Motoman公司加工复合化工材料用的双头机器人



GE公司的激光超声波检测系统

激光超声利用高能激光脉冲来激发超声波并用激光来检测超声回波,具有非接触、远距离探测、频带宽以及检测可达性好等优点。尤其适用于处于一些恶劣环境(如高温、腐蚀、辐射)及具有较快运动速度的被检件。

小批量生产,手工劳动量大,因此,用机器人代替手工劳动的需求显得越来越突出,近年来在该方面进展突出,据国外专家指出,凡是能用手工劳动的地方,均可用机器人操作。

2 自动化设备的配套

由于复合材料结构件品种多、结构复杂,其加工既需要通用自动化设备,也需专用设备。以HITCO公司为例,配备了一系列的复合材料自动化加工设备,自动化投资主要取决于工件及结构种类,设备总成本可达几百万美元。

该公司配备了2~3台自动铺带机和1~2台自动铺丝机来取代某些复合材料手工铺层工艺。此外,自动铺带及铺丝机的采购还需要有相应的配套设备,包括CNC钻孔机及层板切割系统、运送设备、热压罐等。HITCO公司增加了2台新热压罐,其中1台长12.2m、高4.6m。此外,该公司还配备了Gerber技术公司提供的CNC铺层切割系统、1台从Flow国际公司采购的六坐标喷水切割机、1台由Virtek Vision国际公司提供的激光定位系统、1台来自铺层技术公司(英国)的热隔膜成型机、1台购自Radvis工程公司的自动化三角形材拉挤设备。

复合材料自动化检测技术

复合材料检测技术的自动化是传统检测技术的发展,极大地推动了检测技术的进步。其中激光超声、相

控阵超声检测等是发展迅速的领域。

与传统检验相比,相控阵超声检验改进了探测的概率,并明显加快了检测速度。传统超声检测要用许多不同探头来做综合分析,而相控阵检验用一个多元探头即可达到同样的结果。

GE公司开发了复合材料检测用的相控阵技术,该公司有UTxx先进缺陷探测器,该探测器采用NuScan成像软件包,NuScan相控阵机既可采用脉冲回波技术,也可采用穿透技术,它有128元探头,每一个10cm宽。全部探头以同一顺序启动,而不是离散分批启动,扫描速度达到20m²/h。这种NuScan相控阵缺陷探测器的一个非常重要的特征是可以检测半径范围及边角的缺陷,其原理是“逆向延迟”,方法是将所有的探头指向半径范围,根据返回每一探头的响应时间测定曲率半径,然后将半径范围转换为平面。检测结果可以用各种形式显示,包括A、B、C、D扫描以及三维成像。通过波束的自扫描、面积测量以及横断面的切取即可对缺陷进行探测,确定其尺寸。

相控阵超声试验机已在航空界用于复合材料结构的检测,如JAS 39机体结构、发动机风扇叶片。检测疏松的灵敏度可达3%,已成功用于分层、脱胶、孔隙的检验,可以提供极好的探测概率和重复性好的检验结果,并达到复合材料制造所需的检验速度。

目前,激光超声主要用于检测复合材料结构,由洛马公司开发的Laser UT用于F-22进气道的检测。该系统有2个激光器,一个激光器通过热弹性膨胀的机理在复合材料中产生超声,在此过程中,在构件表面之上10~100μm范围内激光能转变成热,温度的升高使材料产生局部膨胀。如果激光器加热的速度快(10~100ns),膨胀将在超声频率范围内(1~10MHz)产生,超声波将垂直于表面传播而与激光的入射角无关,其入射角可以达到45°,而传统的水浸系统,入射角必须保持在3°以内才能产生超声。

该系统可检测零件的厚度、大小及几何形状,至今已检测了厚达43mm的构件。据悉,该系统检测零件实际并无尺寸及几何形状方面的限制,唯一受到限制的是材料的匹配性。采用该系统检测,所用时间不到2h,而采用第一代检测设备则需花费24h,检验时间减少90%,制造周期可缩短数周。

结束语

通过上述分析可以看出,复合材料自动化制造的大规模实施,可以显著降低复合材料结构件的制造成本,采用一体化模压成型以及铺带、丝束铺放自动化检验尚有大的发展空间。因此采用自动化批量生产工艺,是促进复合材料产品降低成本、得到更广泛应用的必由之路。(责编 小颖)