

自动铺丝技术及其在 A350 制造过程中的应用

郑广强, 姚 锋, 周晓芹

(中航复合材料有限责任公司, 北京 101300)

[摘要] 介绍了自动铺丝技术的原理、特点、优势, 并从铺丝设备、铺丝材料、铺丝工艺、应用等几个方面进行了阐述。以空客 A350 复合材料制造技术为背景, 分析了其机体结构的制造特点以及自动铺丝技术的应用。提出了复合材料结构自动铺丝技术工程化应用关键问题。可为国内自动铺丝技术在大型客机复合材料结构成型中的应用提供参考。

关键词: 复合材料; 自动化制造; 自动铺丝

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.16.076



郑广强

硕士、高级工程师, 从事复合材料自动化制造技术研究, 主要研究方向是复合材料自动铺带技术和自动铺丝技术, 参与了国内多个重大项目和型号的复合材料自动化铺放技术研究。

复合材料具有轻质、高强、结构功能一体化和设计制造一体化等优点, 尤其是碳纤维增强复合材料的应用, 可有效减轻飞机结构重量, 提高燃油效率和飞机可靠性。随着材料

技术和自动化制造技术的日趋成熟, 复合材料在飞机上的应用突飞猛进, 应用范围越来越广, 用量越来越大, 尤其是在大型客机上的应用, 以空客 A350 为代表的大型双通道宽体客机复合材料用量已经占到机体结构重量的 53%, 整个机身、机翼结构几乎全部采用了碳纤维复合材料(图 1), 航空复合材料时代已经来临^[1-3]。

复合材料用量的大幅提升离不开自动化制造技术的强力支撑, 尤其是自动铺丝技术。自动铺带技术解决了飞机小曲率机翼、尾翼等翼面类复合材料结构的制造问题, 将飞机的复合材料用量提升到结构重量的 25% 左右; 而自动铺丝技术解决了大曲率机头、中机身、后机身、机翼大梁等复杂结构的制造问题, 将飞机的复合材料用量提升到机体结构重量的 50% 左右, 已经成为复合材料工程化应用的里程碑。自动铺丝技术能有效降低生产成本, 提高生产效率, 有利于复合材料构件质量的可靠性和稳定性, 经济效益显著, 已经成为机身结构制造的典型工艺。大型客机

A350 的机身结构、机翼等(图 2)已全部采用自动铺丝技术进行制造^[4-6]。

自动铺丝技术

1 自动铺丝技术原理

自动铺丝技术是指在多坐标自动铺丝机的控制下, 铺丝头将多束预浸丝束通过放卷、导向、传输、压紧、切割、辊压等功能在压辊下集束成带, 并按照计算机规划的轨迹进行铺层的自动化铺放。在铺放过程可实现预浸丝束的单独控制, 实现增减丝束, 并可实现转弯铺放。因此, 自动铺丝具有更强的曲面适应能力, 不仅可以铺放凹面、凸面, 还可以实现开口、补强等变厚铺层, 纤维角度偏差更小, 生产效率更高。

典型铺丝设备主要由机床主体、纱架系统、铺丝头等 3 部分组成(图 3)。机床主体主要实现铺丝头的快速移动和空间坐标的定位; 纱架系统实现预浸丝束料卷的存储、放卷、薄膜回收、张力控制、传输和导向等功能; 铺丝头主要实现预浸丝束的压紧、送进、切割、导向、加热、辊压等

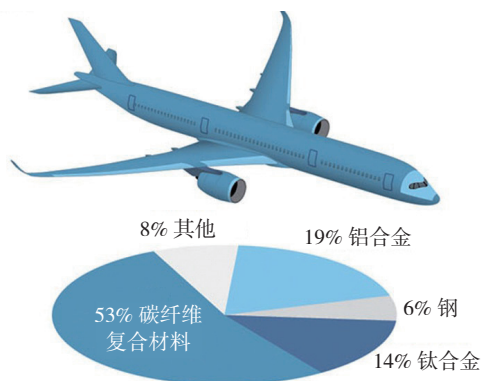


图1 空客A350机体材料应用情况

Fig.1 Material application of A350 airframe structure



图2 自动铺丝技术在A350中机身蒙皮上的应用

Fig.2 Application of automatic fiber placement technology in A350 middle fuselage skin

路径轨迹限制较小,可以实现连续变角度铺放,特别适合大曲率复杂构件的铺放。例如,机身尾段的自动铺放,尤其是 $\pm 45^\circ$ 的铺放,纤维需要根据规划的路径进行转弯,以达到最理想的纤维铺放角度。对于机翼大梁等C型结构件的自动化铺放, $\pm 45^\circ$ 方向和 0° 方向R角处的铺放,铺丝技术可以实现较好地纤维压实。

(4)材料利用率高。铺放过程采用多束预浸丝束,每根丝束根据铺层的轮廓自由增减,尤其适合变厚结构的铺放,例如机身舱门的加厚区、机翼的口盖区域等。铺放过程产生的废料极少,材料的利用率可达95%以上。

2 自动铺丝设备

目前应用于A350制造过程的铺丝机种类主要有立式铺丝机、卧式铺丝机和机械臂铺丝机(图4)。不同结构形式的铺丝机具有不同的特点,适用于不同的零件类型。立式铺丝机适合大型机身曲板结构的自动铺丝,将工装固定于工作区域,无需旋转,实现机身、机翼等较长产品的自动铺放。卧式铺丝机更适合大型筒段的铺放,大型客机的机身筒体直径接近6m,需要大型旋转工装,因此铺丝头在工装的一侧进行铺放效率更高,同时也有利于超大型模具工装的进出和转运。立式龙门结构铺丝机和卧式铺丝机采用机床结构,设备

刚性好、精度高,已经成为机身结构制造的关键设备。机械臂铺丝机普遍采用成熟的工业机器人作为运动机构,设备成本较大型龙门设备低、维护成本低、故障率低,且运动灵活。但机械手末端承载能力有限、刚性较差,因此机械手臂式铺丝机更适用于产品验证或尺寸较小、形状较为复杂的复合材料构件的铺放。

此外,也可以根据丝束料卷和铺丝头的相对位置进行分类,可以分为分离式铺丝机和集成式铺丝机(图5)。分离式铺丝机的料卷存储在纱架内,纱架位于铺丝机的旁边、横梁或者后部,预浸丝束通过长距离传输,运动到铺丝头。该结构是早期典型铺丝机的结构形式。采用分离式结构的铺丝设备,可以加大丝束料卷的单卷体积,增加单卷长度,对于铺放大型制件,可以减少换料的次数,不间断铺丝,具有一定的优势。单卷料卷丝束长度最大可达5000m。但是,长距离传输也会带来一定的弊端,材料的上下料过程用时较长,出现断纱的几率略高,人工维护的时间和成本也比较高。为了克服长距离传输的问题,以EI公司为代表的铺丝设备厂家开发了集成式的铺丝设备,料卷和铺丝头集成在一起,这样减少了丝束的传输距离,降低了丝束接头断开的风险,EI公司同时开发了可更换铺丝头技术,料卷用完就可以直接更换新的铺丝头,减少了上料和穿料的准备时间。集成式铺丝机的料卷体积受到限制,难以安装大尺寸料卷,单卷的长度受到了一定的限制,通常为1500~2000m。但是上下料方便快捷,加上可更换铺丝头,效率大幅提高。目前主流铺丝机设备供应商都开发了集成式铺丝技术,例如EI、Mtorres、MAG、INGERSOLL等公司^[11]。

3 铺丝机的结构适用性

在自动铺丝工程化应用的过程中,需要根据产品的结构形式选择不同结构形式的设备,然后开展基于铺

功能,将丝束铺放在模具上^[7-10]。

自动铺丝技术之所以成为大型客机复合材料自动化制造的典型代表,主要是因为该技术具高效、低成本的技术优势。

(1)加工的零件尺寸没有限制。自动铺丝技术对制件的尺寸大小几乎没有限制,无论是开敞的曲板结构,还是封闭的回转体筒段,设备制造商都可以根据产品的尺寸大小和结构形式开发合适的专用铺放设备。因此,自动铺丝技术完全满足大型客机复合材料结构件制造的尺寸需求。

(2)铺放效率高。自动铺丝技术采用较窄的预浸丝束进行铺层的自动化铺放,铺放过程不需要类似于自动铺带过程的废料去除的环节,在纤维丝束不出现断纱或者其他故障的情况下,铺丝机可实现连续快速铺放,铺放效率极高。

(3)曲面适应性强。由于每根独立丝束宽度较小,受预浸带自然

丝设备的结构适用性研究,主要包括铺丝机的曲面适用性和最短纤维等。

(1) 曲面的适用性。

曲面的适用性,主要考察铺丝设备的适应能力,包括曲面铺放能力、爬坡能力、有无机械干涉等。铺丝机曲面适用性的主要决定因素是铺丝头的结构形式、尺寸大小和压辊变形量等。对于大型客机,机翼、机身结构复合材料制件曲率不是很大,可以选择较宽的丝束进行多丝束铺放,以提高生产效率;对于机翼大梁、起落架舱门、尾段等复合材料构件,宜采用较窄的丝束进行铺放,在制件的复杂曲率区域进行丝束的增减,以适应制件的曲率变化。

(2) 最短纤维的限制。

最短纤维是指铺丝机能铺放的最短的纤维丝束(图6)。由于铺丝头自身结构的限制,可铺放的纤维的最短长度是有限制的。可铺放的最短纤维的长度取决于压辊的直径及切刀至压辊的距离等。以法国 CORIOLIS 的设备为例,可铺放的最短纤维长度是 90mm。对于零件的全铺层,最短纤维几乎没有影响,可以将最短纤维按照居中、左对齐、右对齐,或者选择不要等几种方式进行处理,但是对于子铺层,需要进行净边铺放,出现多余的边角是不允许的。所以,要从产品的最初设计阶段开始,考虑最短纤维的问题,将自动铺丝技术的边界条件加以考虑,这样有利于发挥自动铺丝技术的优势,提高产品的铺放效率。

4 自动铺丝材料

4.1 材料的制备

目前 A350 采用的自动铺丝材料是 6.35mm、12.7mm 等宽度不等的预浸丝束,丝束的宽度精度达到 $\pm 0.125\text{mm}$ 。国外普遍采用分切宽幅预浸带进行预浸窄带材料的制备。分切过程可分为两次进行,先将宽幅预浸料进行第一次分切,并通过盘式收卷的方式,得到较窄的预浸带,这

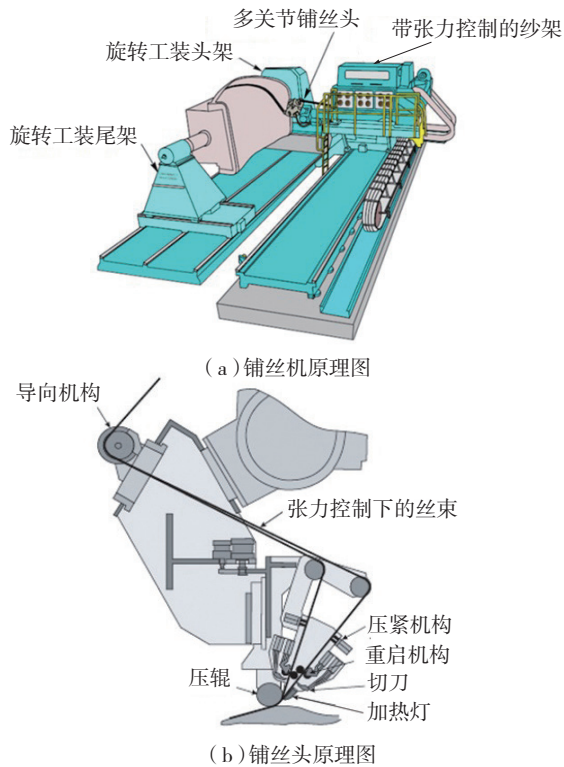


图3 典型自动铺丝设备原理

Fig.3 Diagram of typical fiber placement machine

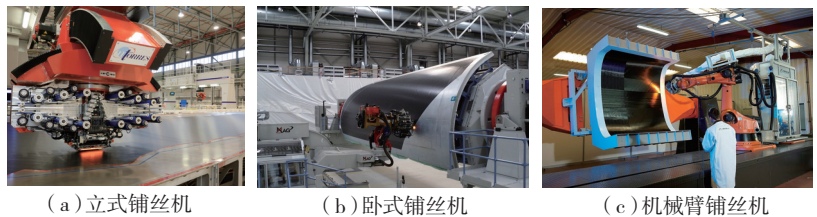


图4 铺丝机类型

Fig.4 Fiber placement machine type

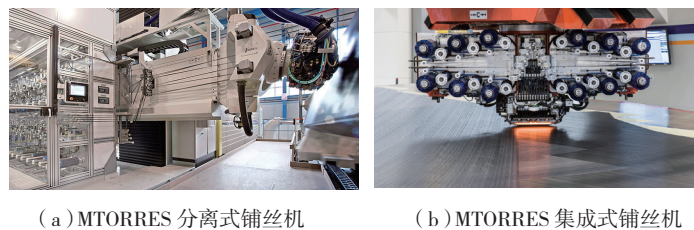


图5 分离式和集成式铺丝机

Fig.5 Separate fiber placement machine and integrated fiber placement machine

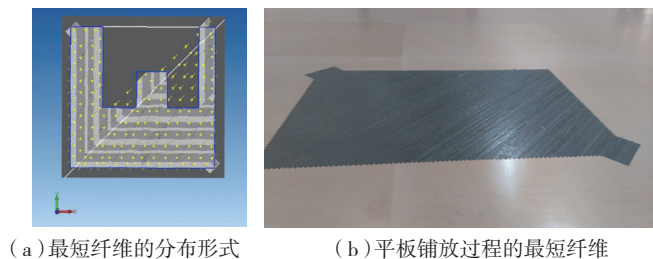


图6 最短纤维的铺放

Fig.6 Laying of short fiber

与自动铺带材料的预浸带制备并无差别；然后将一次分切后的预浸带进行二次精密分切，将预浸带切成预浸丝(图7)。预浸丝的收卷方式为平行卷绕，中间断开的预浸丝束采用热压的方式进行搭接连接，实现长预浸丝的制备。预浸料的分切要采用专用的分切设备，一次分切要保证预浸料和衬纸的有效贴合。分切设备要带有高精度纠偏机构保证纤维的准直度，尽量避免纤维丝的切断，全过程进行张力控制，保证分切流畅和收卷整齐、松紧度合适。二次分切过程同样需要有边缘校正系统，以保证预浸丝束的边缘完整性，降低纤维损伤率。

4.2 材料的工艺适用性

预浸丝束的工艺适用性是影响铺丝效率的关键因素，主要考察材料的宽度、表面粘性、接头质量、边缘损伤、转弯半径等。

材料的宽度主要影响预浸丝束在传输过程的流畅性和铺放间隙。自动铺丝过程，丝束的传输在铺丝头中被机械结构限制在固定的凹槽中，材料的边缘会与凹槽产生一定的摩擦，如果材料的宽度过大，会加大传输过程中的阻力，导致摩擦加重，丝束边缘容易产生毛团堆积在铺丝头中，材料的通过性差。同时，宽度偏差还会影响铺丝间隙。一个是带与带之间的间隙，一个是丝与丝之间的间隙。如果材料的宽度精度达不到要求，将引起丝与丝之间的搭接或者间隙，影响制件的表面铺放质量。因此，要求预浸丝的宽度在设备的匹配范围之内。

材料的表面粘性。铺丝材料的表面粘性是对材料工艺性评价的重要因素，粘性太大容易出现树脂粘接造成铺丝头送丝出现故障；粘性太低则在铺放过程中层间或贴模面无法有效贴合。因此需要一个适中的表面粘性，既不会造成铺丝头送丝故障也不会造成层间不粘合现象。

接头质量是影响铺丝效率的另一个关键因素。预浸丝束接头要能承受一定的张力，有利于铺丝效率的提高。铺放过程，丝束需要通过放卷、导向轮传输、压紧、裁切、导向槽导向，最后在压辊下集束成带，全过程实现张力的控制，每个环节都对接头的质量是一个考验。如果接头的搭接质量不好，很容易出现断纱现象，一旦出现断纱，就需要操作人员进行维护，重新接入，大大降低了铺放效率。此外，也要对接头在制件中的分布加以约束，波音和空客对于接头的铺放均有工艺规范进行约束。

材料边缘的损伤也是一个重要的因素。自动铺丝材料是从手工铺放材料经过分切得到的，两者相同点很多。铺放材料的固化单层厚度、挥发成分含量、单位面积的纤维质量等物理参数在预浸料制备阶段已经确定，两者并无差别，但是与手工铺放工艺不同的是，铺丝材料在分切制备过程是沿着纤维方向进行的细分过程，分切的过程会切断一定的纤维，造成一定的纤维损伤。因此，要在分切过程中控制切刀与母带的纤维方向一致，减小材料的横向浮动，降低纤维的损伤率。

预浸丝束转弯半径主要是考察

其在复杂曲面的可铺性。材料的转弯特性取决于材料的宽度、厚度、粘性等，而起主导作用的就是材料的宽度，越窄的材料转弯半径越小。因此，对于复杂曲面的铺放，宜采用较窄的料带。图8是某6.35mm宽铺丝材料的转弯半径试验效果。

5 自动铺丝关键工艺参数

自动铺丝过程的工艺参数较多，关键工艺参数主要有轨迹规划策略的选择，铺放间隙的控制，丝束重叠程度的选择，铺放压力、铺放速度和铺放温度的优化等，最终的目标是通过获取最优的工艺参数，实现产品的高质量高效率铺放，纤维角度变化小、间隙均匀无明显搭接、制件厚度均匀、切表面无明显鼓包或者凹陷、内部质量和孔隙率均需达到制造技术要求。

轨迹规划策略的选择，主要有与参考线成固定角算法、测地线算法、平行线算法、变角度算法等，其中与参考线成固定角算法是目前最为常用的轨迹规划算法。进行轨迹规划时，需事先确定参考方向，所有角度轨迹均按一定的规则与该方向成固定的角度。好的轨迹规划需要同时考虑角度偏差的大小、引起的铺放

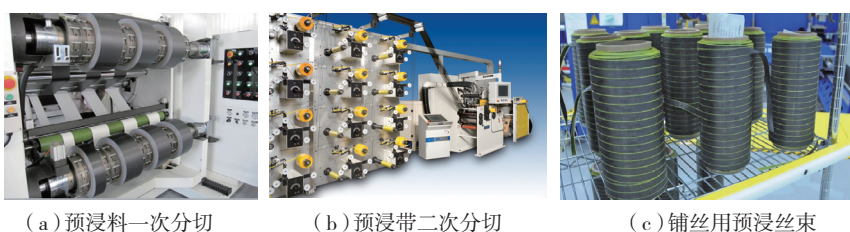


图7 预浸丝束的制备

Fig.7 Process of slit tape preparation

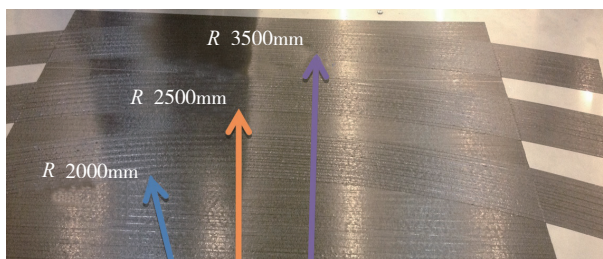


图8 2m、2.5m、3m转弯半径试验结果

Fig.8 Steering experiment with radius of 2m, 2.5m, 3m

间隙的变化情况、铺层的铺覆性、纤维的变形能力等。铺放间隙的大小一般由设计或者制造规范给出,尽量避免铺放过程的搭接。丝束两端的重叠是指同一角度下的不同分区间的丝束起始端和末端与相邻区域的重叠情况,重叠程度将影响局部的厚度,给装配带来一定影响,需要与设计人员进行沟通确定参数。

自动铺丝工艺成型过程中,为了保证铺放质量,提高铺放效率,还需要通过对铺放工艺参数调整和优化来实现高质量的铺放。关键工艺参数主要有铺放温度、铺放压力、铺放速度等。铺放温度参数调节可以改善铺放过程中预浸丝束的粘性,实现良好粘贴;铺放压力可以提高预浸丝束层间的粘合程度;铺放速度有助于提高制件生产效率。因此,在实际铺放工艺实践中,需要针对铺放速度、铺放压力、铺放温度进行匹配性工艺试验,找出最佳的铺放工艺参数。

自动铺丝技术在 A350 上的应用

1 机身蒙皮铺丝

空客 A350 与波音 787 之间最大的差别在于机身的制造。波音 787 机身采用大型整体筒段,这种方式的技术风险较大,需要大型的旋转工装、大型的转运设备、大型热压罐和大型检测加工设备。要求技术水平较高,配套设施投资较大。此外,对于大型整体工装的设计与制造,组装和封装等都会带来一定的技术风险,尤其是大型回转工装的密封问题,需要进行优化设计。空客选择了分片结构的曲板,最终装配成机身段,只在机身曲率变化比较大的尾段采用了整体结构。这种不太激进的解决方案降低了风险,同时也有一些优势,曲板的性能可以根据所处机身位置的不同进行优化设计,同时可以通过加长曲板的长度而达到减少装配的目的。此外,分片曲板的其他好处

有:更容易制造、可以使用更小直径尺寸的热压罐、成型工艺简单、技术风险小、后期维修更加容易。在机身曲板的自动铺丝制造过程中,最长的中机身曲板采用了龙门结构铺丝机;其他机身曲板或采用龙门结构铺丝机,或采用卧式铺丝机;起落架舱门采用了机械手铺丝机(图 9)。

2 机翼大梁铺丝

空客公司采用卧式铺丝机进行机翼大梁的生产(图 10(a))。A350 的前翼梁长 31.2m,截面尺寸从根部的 1.8m 过渡到梢部的 0.3m,分成 3 段进行铺放,即长为 7m 的内侧梁、长为 12.7m 的中梁和长为 11.5m 的外侧梁。后翼梁 27m,分成 3 段,每段长近 10m。材料是 Hexcel 的碳纤维环氧预浸料 M-21E,带宽为 6.35mm。设备采用了 M.Torres 公司卧式铺丝设备,带工装旋转轴^[12-15]。由于采用了旋转芯模,限制了大梁的成型长度,所以空客必须将 30m 的大梁进行分段制造。如果整体进行旋转工装铺放,刚度很难保证。正是看到这种弊端,EI 公司为波音公司 777X 项目定制了集成式大梁铺丝设备,工装固定,直接进行铺放(图 10(b))。该项目的优势在于不用再将大梁分成几段,可以整根铺放,减少

了分段连接的装配。在铺放过程中,铺丝头进行大角度旋转或者摆动,以适应 C 形截面引起的角度变化。由于采用了集成式的铺丝头,实现了预浸丝束的双向铺放,并且减少了纤维传输过程的扭转,有利于产品的高效铺放并获得较好的铺放效果。

3 机翼蒙皮铺丝

众所周知,自动铺带技术目前广泛应用于航空复合材料自动化制造领域,甚至成了翼面类结构自动化铺放的专用装备。因此,在早期 A350 机翼蒙皮一直采用自动铺带技术进行铺层的自动化铺放(图 11(a)、(b))。但是,随着铺丝技术的进步和演化,自动铺丝的优势逐渐凸现出来,特别是边缘轮廓复杂,并带有口盖、变厚铺层的机翼蒙皮,铺丝技术更胜一筹(图 11(c)、(d))。所以空客采用铺丝/铺带一体机进行蒙皮的自动化铺放,采用自动铺带头进行表层玻璃布和铜网的铺放,然后进行铺丝头的自动更换,换成 12.7mm×24 束铺丝头,铺放中间的碳纤维铺层。采用该种工艺的优势主要体现在两个方面:

(1) 自动铺丝的效率更高。自动铺带技术采用较宽的预浸带,为了适应零件的铺层轮廓,铺带过程

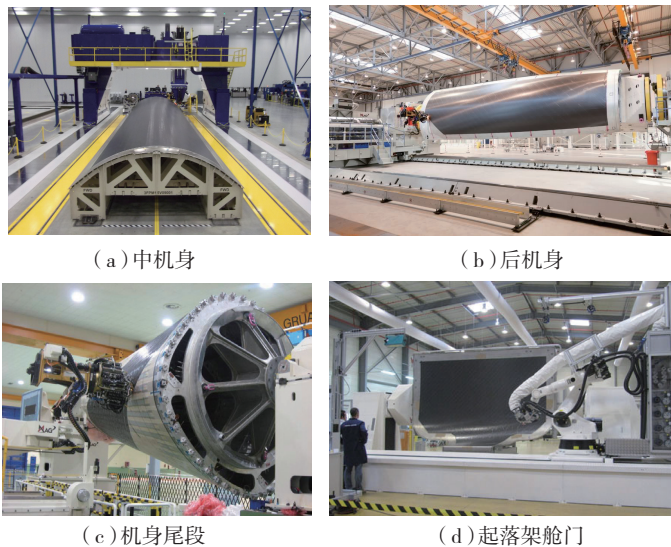


图9 自动铺丝技术在A350机身结构的应用

Fig.9 Application of fiber placement technology in A350 fuselage structure

中需要将每一条预浸带的起始端和末端采用超声技术进行端头轮廓的切割,并且需要将不要的废料扔进铺带机的废料箱,或者铺放在模具的边缘。废料的去除过程比较频繁,需要大量的超声切割过程,还需要铺带机在制件铺放区域和废料区频繁移动扔废料,占用了较多的铺放时间,大幅降低了铺放效率。而铺丝技术采用窄带,可以根据零件的铺层轮廓边界自动增减丝束,不存在废料取去除的过程,可实现快速连续铺放。此外,适当地加宽单根丝束的宽度和丝束的数量,集束成较宽的丝束带,同样能达到铺带技术的带宽优势。M.TORRES公司和空客的统计数据表明,A350机翼蒙皮采用了自动铺丝技术以后,单块蒙皮的铺放周期从5~7天降到了1.6~3天,生产效率大幅提高。

(2)材料利用率大幅提高。通过下蒙皮的铺放可以看出,机翼下蒙皮边缘带有较多的耳片,并且在蒙皮中间分布了大量的油箱口盖区域。采用自动铺带技术铺放的过程中,为了减少废料的去除,提高铺放效率,简化了铺放边缘轮廓,因此在蒙皮外轮廓区域浪费了较多的原材料。在油箱口盖区域直接铺放了预浸带,固化后采用机械加工进行去除。采用自动铺丝技术铺放,可以按照固化蒙皮的净尺寸进行铺放,尤其是边缘耳片和口盖区域,节省了原材料。M.TORRES公司和空客的统计数据表明,单块蒙皮的成品/原材料用量比,由之前的1.24降低到1.02。材料的利用率从81%提升到98%,几乎没有原材料的浪费。

国内大型客机应用研究 装备基础

由于美国和欧盟对25mm以下带宽的铺丝设备设置了出口限制,无法引进工程化应用高端铺丝设备,导致国内开展铺丝工艺工程化应用

研究受到限制。近两年,中国航空工业、中国商飞、恒神等公司引进法国CORIOLIS公司铺丝设备和技术,开展铺丝工艺工程化应用研究。值得一提的是,中国航空制造技术研究院、中航复材公司联合国内的科研力量,通过引进Coriolis铺丝技术,集智攻关,突破了多轴联动控制技术、大跨度轻质高刚性横梁结构设计等制造等多项关键技术,研制了国内首台工程化应用级别的大型龙门自动

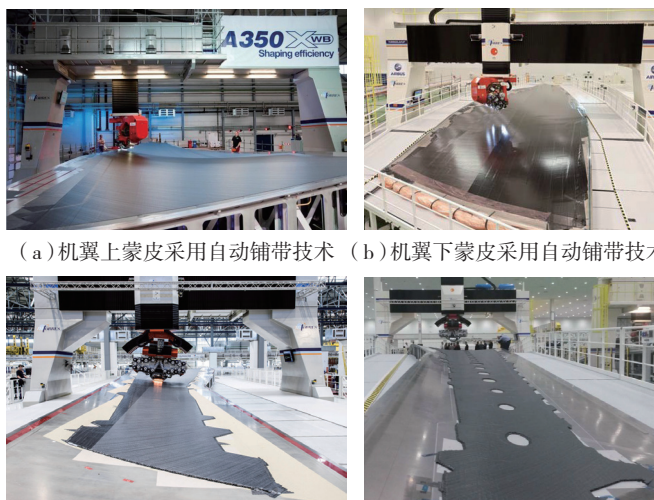
丝束铺放设备(图12)。设备X向行程30m,Y向行程6.5m,能实现最多32束6.35mm预浸丝束的高效铺放。该设备是国内目前唯一可以完成大尺寸复合材料机身壁板研制的高端专用装备,为我国飞机研制提供了强力技术保障。此外,其他各大科研院所也正在开展基于机械臂铺丝技术的研究和工艺验证。相信在不久的将来,自动铺丝技术应用将在国内遍地开花,推动我国复合材料自动化



(a)空客 A350 采用旋转式工装 (b)波音 777X 采用固定式工装

图10 机翼大梁自动铺丝

Fig.10 Fiber placement of wing spar



(a)机翼上蒙皮采用自动铺带技术 (b)机翼下蒙皮采用自动铺带技术

(c)机翼上蒙皮采用自动铺丝技术 (d)机翼下蒙皮采用自动铺丝技术

图11 A350机翼蒙皮铺带到铺丝技术的转变

Fig.11 Change of A350 wing skin technology, ATL to AFP



图12 中航复材自动铺丝机

Fig.12 ACC fiber placement machine

制造技术向前发展。

结束语

自动铺丝技术已经成为国外大型宽体客机制造的关键技术,具有更强的结构适应性,可以铺放更大的复合材料构件,在大型宽体客机复合材料构件的自动化成型制造中应用广泛。国内有关自动铺丝成型技术的研究尚处于起步阶段,无论是铺丝设备、铺丝材料,还是成型工艺,基础还比较薄弱,与国外还有较大差距。材料还依赖于国外的成熟材料,设备也只能从个别国家引进小型设备,真正的高端装备还未引入,阻碍了自动铺丝技术在国内的应用研究和发展。C919已经首飞,未来的大型客机也已经提上日程,自动化制造技术的需求非常紧迫。没有先进的大型自动铺丝装备,未来的大型客机就难以大规模应用复合材料。国内应加快研发进程,加大各项投入,引进高端自动铺丝技术和装备,同时加大材料和工艺工程化应用研究,早日将自动铺丝技术大规模应用于我国大型客机。

参考文献

- [1] 汪萍. 复合材料在大型民用飞机中的应用[J]. 民用飞机设计与研究, 2008(3): 12-18.
WANG Ping. Application of composite material in lager civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2008(3): 12-18.
- [2] 蔡闻峰, 周惠群, 于凤丽. 树脂基碳

纤维复合材料成型工艺现状及发展方向[J]. 航空制造技术, 2008(10): 54-57.

CAI Wenfeng, ZHOU Huiqun, YU Fengli. Current status and development trend of epoxy resin carbon fiber reinforced composites forming process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(10): 54-57.

[3] 张晓虎, 孟宇, 张炜. 碳纤维增强复合材料技术发展现状及趋势[J]. 纤维复合材料, 2004, 30(1): 50-58.

ZHANG Xiaohu, MENG Yu, ZHANG Wei. Development and tendency of carbon fiber reinforced composite materials[J]. Fiber Composite, 2004, 30(1): 50-58.

[4] 杨乃宾. 新一代大型客机复合材料结构[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 596-604.

YANG Naibin. Composite structures for new generation of large commercial jet[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 596-604.

[5] MARSH G. Air framers exploit composites in battle for supremacy[J]. Reinforced Plastics, 2005, 49(3): 26-32.

[6] 李东升. 大型客机复合材料结构的现在和将来[C]// 复合材料: 创新与可持续发展(上册). 北京: 中国科学技术出版社, 2010.

LI Dongsheng. Structural composite airliner now and in the future [C]//Composite Materials: Innovation and Sustainable Development (Volume I). Beijing: China Science Technology Press, 2010.

[7] LUKASZEWICZ D H J A, WARD C, POTTER K D. The engineering aspects of automated prepreg layup: history, present and future[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(3): 997-1009.

[8] 肖军, 李勇, 文立伟, 等. 树脂基复合材料自动铺放技术进展[J]. 中国材料进展, 2009, 28(6):28-32.

XIAO Jun, LI Yong, WEN Liwei, et al. Progress in automatic placement technology of resin matrix composites [J]. Progress of Materials in China, 2009, 28(6):28-32.

[9] 林胜. 自动铺带机/铺丝机(ATL/AFP)—现代大型飞机制造的关键设备(上)[J]. 世界制造技术与装备市场, 2009(4):84-89.

LIN Sheng. ATL/AFP—the key machine for manufacturing of modern large airplane (A)[J]. World Manufacturing Engineering and Market, 2009(4):84-89.

[10] 石林. 自动铺丝技术在航空工业中的应用现状[J]. 航空维修与工程, 1997(9):11-13.

SHI lin. Application status of automatic tow placement in aviation industry [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 1997(9):11-13.

[11] SLOAN J. ATL & AFP: Defining the megatrends in composite aerostructures[EB/OL]. (2008-06-30)[2017-05-17]. <http://www.compositesworld.com/articles/atl-and-afp-defining-the-megatrends-in-composite-aerostructures>.

[12] MARSH G. Airbus takes on Boeing with reinforced plastic A350 XWB[J]. Reinforced Plastics, 2007, 51(11):26-29.

[13] MARSH G. Airbus A350 XWB update [J]. Reinforced Plastics, 2010, 54(6):20-24.

[14] MARSH G. Wing worker for the world[J]. Reinforced Plastics, 2010, 54(3): 24-28.

[15] 王菲, 杨博, 陈永清, 等. 大尺寸复合材料翼梁的研制[J]. 航空制造技术, 2015(S1):55-60.

WANG Fei, YANG Bo, CHEN Yongqing, et al. Manufacturing of large scale composites spar[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(S1):55-60.

通讯作者: 郑广强, E-mail: guangqiangzheng@126.com.

Application of Automatic Fiber Placement Technology in A350 Manufacturing

ZHENG Guangqiang, YAO Feng, ZHOU Xiaoqin

(AVIC Composite Corporation Ltd., Beijing 101300, China)

[ABSTRACT] Taking Airbus A350 composite manufacturing technology as background, this paper analyzed the manufacturing features of aircraft fuselage structure and the application of automatic fiber placement (AFP). The principles, characteristics and advantage of AFP are introduced; AFP machine, slit tape, process and application are also covered in this paper. The key issues in engineering application of composite structure AFP technology are put forward. It can provide reference to the application of Chinese domestic AFP technology in composite structure forming.

Keywords: Composite; Automated manufacturing; Automatic fiber placement

(责编 逸飞)