

先进树脂基复合材料自动丝束铺放技术研究现状及发展方向

Research Status and Future Trend of Automated Fiber Placement Technology for Advanced Polymer Matrix Composites

先进复合材料重点实验室
北京航空材料研究院

张 洋 钟翔屿 包建文

[摘要] 主要基于国内首台自动丝束铺放工程样机系统为研究平台,介绍国内先进复合材料自动丝束铺放技术方面的研究现状,主要从丝束铺放工艺、铺放材料性能、专用铺放模具、铺放控制软件等多个角度进行分析;针对典型航空结构开展工艺铺放试验,总结出现阶段丝束铺放存在的主要问题与解决方法,初步形成复合材料自动丝束铺放工艺技术体系。最后,基于实际铺放工程实践中的经验总结,讨论了国内先进树脂基复合材料自动丝束铺放技术未来的主要发展方向。

关键词: 先进树脂基复合材料 自动丝束铺放技术 典型航空结构

[ABSTRACT] Due to lack of the engineering AFP system platform in China, studying on the AFP technology moves very slowly. The research status of advanced polymer matrix composites AFP technology is discussed mainly based on the first AFP engineering system in China for research platform. The fiber tape laying technology, the properties of the fiber tape, special mould used for the AFP and the AFP control software are analyzed from different angles. The typical aeronautic composites structure is studied by using the AFP technology, a lot of main problems and solutions of the AFP technology at the present stage in China is summed up. The AFP technology system are initially formed. Finally, based on the engineering experiences, the main tendency of the advanced polymer matrix composites AFP technology in China are discussed.

Keywords: Advanced polymer matrix composites Automated fiber placement technology Typical aerospace structure

先进树脂基复合材料已经成为航空工业的主要结构材料,自动化、整体化和低成本制造技术已经成为当今复合材料制造的主流趋势^[1]。目前,国内由于材料和制造技术的限制,难以充分发挥复合材料的优势,极大

地限制了复合材料在飞机上的广泛应用,制约了飞机结构效率的提高。自动丝束铺放技术(Automated Fiber Placement)是重要的先进树脂基复合材料自动化成型技术,是在缠绕技术和自动铺带技术的基础上发展起来的新型复合材料自动化成型技术^[2-3]。

国外自动铺放技术始于20世纪60年代,在美国空军实验室的支持下起步,后经ACT、CAI(计算机辅助设计)等计划的支持迅速发展,目前自动铺带机、自动铺丝机、各种预浸带/纱已经形成系列产品供应,广泛应用于多种航空航天器的树脂基复合材料成型制造。由于自动铺放成型采用的材料体系成熟度高,设计成型方法继承性好,易于数字化和自动化制造,已经成为发达国家飞机复合材料大型复杂构件的主要成型方法,获得了广泛的应用。

国内对于自动丝束铺放技术的探索研究要早于自动铺带技术,研究主要集中在丝束铺放轨迹规划与仿真等理论方面的研究。邵冠军等^[4]设计了一种自由曲面复合材料构件的纤维铺放规划算法,考虑到了适于开放曲面复合材料构件的纤维铺放;党旭丹等^[5]开展了基于测地线的平行等距规划算法的研究工作,提出利用测地线偏移初始轨迹,概念明晰但计算量甚大难以实际应用;林福建^[6]则将零件表面离散为三角网格,在此基础上进行路径规划,该方法要求零件必须是完全封闭的;李善缘等^[7]提出给定一组数据点构造样条曲线正交投影到给定曲面形成基准铺丝路径,按投影等距平移的方法进行轨迹规划,但数据点是否正确未作分析;周焱^[8]等以封闭曲面类构件为研究对象,提出了基于参考线的轨迹生成算法:通过以轨迹中心线的副法矢为方向得到等距点,根据这些等距点在曲面上的投影插值得到等距线,依据当前铺丝路径上各点与等距线的距离关系,求得该铺丝轨迹上各点处的丝束信息,完成自动铺丝的覆盖性分析。

由于自动丝束铺放技术远比自动铺带技术更复杂,研究基础薄弱,目前国内尚无自动铺放设备定型产品在

生产中得到应用,缺乏工程化自动丝束铺放设备,导致相关铺放工艺、材料应用研究进展缓慢。2009年先进复合材料国防科技重点实验室与南京航空航天大学联合研制了国内首台自动丝束铺放工程样机并投入使用。该设备具备8丝束6.35mm宽预浸丝束独立控制能力,铺丝轨迹规划设计软件可以读取CATIA等模型文件,初步具备单层及多层铺丝轨迹生成与仿真能力。本文主要是基于国内首台自动丝束铺放工程样机系统开展相关铺放工艺及试验,介绍目前先进树脂基复合材料自动丝束铺放技术的研究现状,分析自动丝束铺放工艺过程中存在的主要问题与解决方法,最后结合工程应用实践经验对未来自动丝束铺放工艺的发展作出展望。

1 先进复合材料自动丝束铺放技术研究现状

1.1 自动丝束铺放技术简介

自动丝束铺放技术采用多束(最多可达32根)预浸纱/分切的预浸窄带,分别独立输送、切断,由铺丝头将数根预浸纱在压辊作用下集束成为一条宽度可变的预浸带(宽度可以通过控制预浸纱根数调整)后铺放到芯模表面。

1.2 丝束铺放材料的制备

自动丝束铺放工艺中使用的原材料是预浸丝束,预浸丝束主要是由传统的预浸料经过二次分切加工而来的。预浸丝束的制备方法主要有2种:(1)直接预浸法。此方法是将干态纤维束直接预浸树脂,并通过相关整形设备制成预浸丝束的过程。直接预浸法的最大问题是树脂含量和丝束宽度无法精确控制,制备出的预浸丝束会极大的影响铺放工艺过程的顺利进行,最终导致铺放完成的制件质量不可控,因此现阶段已不采用这种方法。(2)二次分切法。主要是在传统热熔法制备预浸料的基础上进行二次分切来制备相应规格的预浸丝束。采用此方法制备的预浸丝束中的树脂含量及丝束宽度可实现准确控制,基本满足采用自动丝束铺放工艺制备复合材料制件的需求。

采用二次分切法制备预浸丝束的基本流程如图1所示。首先根据复合材料性能设计的需要选择合适的树脂基体及增强纤维,按照传统的热熔法制备出宽幅预浸料,在此工艺过程中可以精确控制树脂含量、纤维面密度及挥发份含量等关键技术指标,保证制备完成的预浸丝束满足使用要求;其次,制备完成的宽幅预浸丝束按照分切机的不同要求实现1级粗切,加工成窄幅预浸带,为后续精密分切奠定基础;最后,将窄幅预浸带经过精密分切机及复绕设备完成特定尺寸预浸丝束的制备,在加工过程中通过调节分切宽度、切刀深度、复绕往复长度、复绕张力及停留时间控制等参数,最终完成预浸

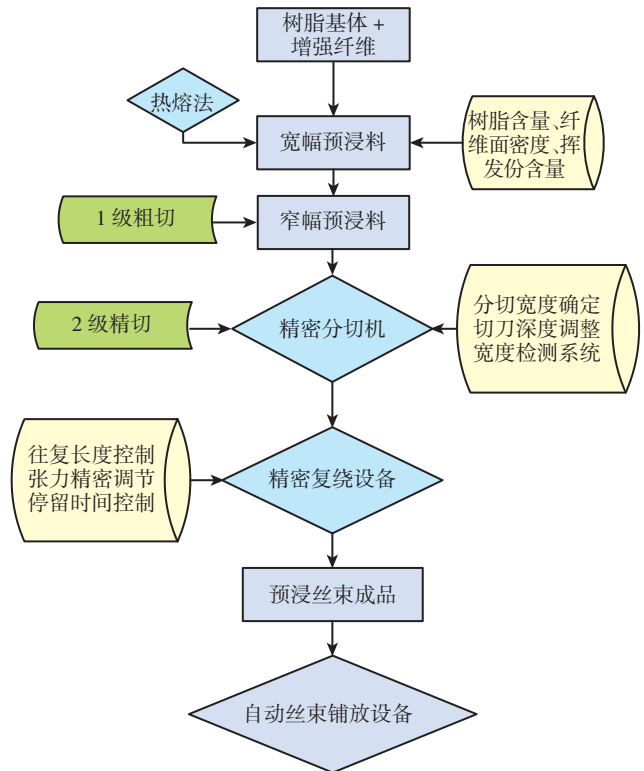


图1 预浸丝束制备流程

Fig.1 Typical making procedure of fiber tape

丝束成品的制备。如图2所示,典型预浸丝束的宽度有3.17mm、6.35mm及12.7mm3种规格。

1.3 丝束铺放工艺

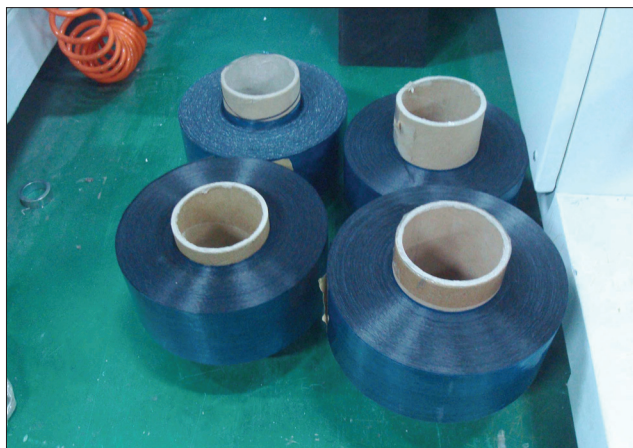
目前的自动丝束铺放设备尽管可以进行数控编程控制,但是这种AFP机床和典型的金属切削数控机床存在着较大的不同,目前(包括国外成熟的AFP机床)仍难以实现或者达到典型金属切削机床那样的高水平的人机交互操作效果,现阶段的丝束铺放水平很大程度上与构件制造设计及编程代码生成及铺放经验的积累有直接的关系。

为了保证铺放工艺过程的顺利进行,需要针对铺放过程中的多个参数进行调节,保证多参数的匹配,顺利实现铺放工艺过程。铺放工艺参数的调节主要包括:铺放温度、铺放压力、粘性控制、输送张力的调节、铺放基准点的定位、各运动轴的空间位置实时调节与监控、程序代码的修正等方面内容。

1.3.1 铺放温度调节

自动丝束铺放工艺过程中,铺放温度参数是最主要的工艺参数之一,调节此参数的主要目的是改善预浸丝束的铺敷性,提高铺放过程中丝束的粘性,保证铺放到制件表面后丝束彼此间的有效黏和,实现预浸丝束的良好贴覆。

铺放温度主要是通过调节铺丝头前端的加热系统



(a) 粗切后窄带



(b) 分切后的预浸丝束

图2 预浸丝束制备

Fig.2 Manufacture of fiber tape

来实现,目前我们的自动铺放系统采用红外加热灯释放的热量来调节铺放温度。通过调节加热灯的功率,增加热量的释放,经过热传导使周边环境温度升高,铺放过程中经过此区域的预浸丝束经过短暂预热后其粘性增加,之后经过铺放压辊的压实,表现出良好的铺敷性和柔顺性,可显著提高铺放质量;若预浸丝束本身具备良好的粘性,则不需要通过调节铺放温度来改变粘性,可以适当减小加热功率或者直接关闭,避免预浸丝束从出丝嘴输出后由于环境温度增加而造成丝束过黏,导致铺放工艺过程中出现扭曲、变形、褶皱等缺陷。

铺放系统通过调节红外加热灯的加热功率改变铺放温度,加热灯的总功率是300W。通过表1可以看出,铺放加热温度在20~40℃区间时,铺放效果较好。较低及较高的铺放温度均不利于铺放工艺过程的正常进行。

1.3.2 铺放压力调节

铺放压力参数的调节是铺放工艺过程中的另一个

表1 铺放温度与铺敷效果的关系

加热功率	铺放温度 /℃	铺敷效果	铺放速度 / (mm·s ⁻¹)
30% (90W)	14.4	较差	10.4
40% (120W)	23.7	良好	
50% (150W)	47.1	良好	
60% (180W)	54.1	较黏	
70% (210W)	64.2	过黏	

重要的参数。在预浸丝束铺放过程中通过施加适当的压力,可以有效改善预浸丝束的铺敷性,提高丝束间的层间贴合质量。目前自动铺丝系统主要是通过铺丝头前端的具有一定变形量的弹性压辊提供铺放所需的压力,铺放压力可以通过调节压辊气压大小实时进行控制。

通过表2可以看出,在加热功率和铺放速度一定的情况下,铺放压力在0.2~0.3MPa区间时,预浸丝束的铺放效果较为理想。铺放压力较低时,预浸丝束层间无法有效贴合,丝束极易自身发生错动,导致铺放精度下降,影响最终铺放制件的质量;铺放压力较高时,丝束极易在过大的压力作用下发生弹性变形,造成丝束褶皱、碾压及变形等缺陷,极端情况下会出现丝束脆端、强行错位等严重铺放缺陷,影响自动丝束铺放工艺过程的顺利进行。

表2 铺放压力与铺放效果的关系

加热功率	铺放压力 /MPa	铺敷效果	铺放速度 / (mm·s ⁻¹)
50% (150W)	0.05	较差	10.4
	0.1	一般	
	0.2	良好	
	0.3	良好	
	0.4	较差	
	0.5	丝束变形	

1.3.3 粘性控制

预浸丝束的粘性对自动丝束铺放过程中会产生重要的影响,通过对预浸丝束粘性的控制,可以实现铺放过程中丝束间良好的粘合。预浸丝束粘性的大小最根本的决定因素是树脂含量的控制,较高的树脂含量制备出的丝束粘性较高,树脂含量较低的丝束粘性较低。在树脂含量一定的情况下,预浸丝束的粘性主要通过铺放温度的高低进行调节。

与手工铺放方式的不同,自动丝束铺放工艺对丝束粘性在不同阶段有不同的要求。例如为了保证预浸丝束具备良好的通过性,在从预浸纱箱抽出后到达模具表面期间的输送过程中,预浸丝束应保持较低的粘性,此

时通过降低输送过程中的环境温度,使预浸丝束保持较低的粘性,确保丝束与通道及设备不发生粘黏,实现丝束的有效通过。当预浸丝束到达铺放模具表面后,为了实现丝束彼此间的有效黏合,需要提高铺放温度及铺放压力,增加预浸丝束的粘性,改善铺放质量。因此铺放工艺过程中需要预浸丝束对温度具有良好的敏感性,才能满足自动丝束铺放的工艺需要,保证铺放效果与质量。

1.3.4 铺放工艺过程中的张力控制

预浸丝束在铺放工艺过程中必须精确地控制张力的尺寸。合适的张力可以提高铺放工艺过程的顺畅性,有利于舒展预浸丝束,降低铺放过程中故障率,可以显著提高铺放效率,改善铺放产品的质量。

铺放工艺系统中的张力控制系统主要通过纱筒退绕时的气动张力调节系统组成。铺放系统中的张力大小控制应该结合预浸丝束本身的刚性、输送最大牵引力及铺放制件的具体型面来综合考虑。

(1) 预浸丝束刚性。

预浸丝束形态较软时,较大的张力极易使其发生弹性变形,丝束宽度会由于变形而发生变化,直接影响铺放精度;预浸丝束形态较硬时,较低的张力将无法使其在预定轨道内进行输送,极易由于丝束本身发生形变而脱离预定轨道,这种现象的表现形式是铺放过程中出现出纱故障,输送系统无法完成预浸丝束的输送,导致铺放过程失效。

(2) 输送最大牵引力。

自动丝束铺放工艺的最大特点是可以单独输送预浸丝束,预浸丝束输送运动的原动力是自动铺放设备中输送系统的牵引力。预浸丝束在输送牵引力的作用下,在铺放设备内部按照程序指令进行运动,实现制件的精密铺放。在这个过程中,输送牵引力应克服丝束本身输送阻力、纱筒自身张力、输送张力等,当输送牵引力大于丝束张力时,丝束在输送系统作用下可以实现平稳输送;当小于丝束张力时,预浸丝束无法运动,或者丝束出现断续运动的现象,这样都将导致铺放过程中出现错误报警,无法正常实现铺放的自动化工艺过程,最终预浸丝束输送失败。

(3) 铺放制件具体型面。

预浸丝束铺放过程中的张力大小与铺放制件具体型面结构也存在一定的关系。如当铺放凹曲面时,过大的张力极易将丝束拽起,造成架桥等缺陷,而铺放凸曲面时张力的影响较小。因此,应该根据铺放具体型面的不同,制件铺放的不同阶段设置不同的铺放张力,保证丝束铺放的正常进行。

1.3.5 多参数协调影响

铺放工艺过程中,应该综合考虑铺放温度、铺放压力、粘性控制及张力调节等多参数的影响。如铺放温度较高时,所需铺放压力就较低;预浸丝束的粘性较大时,应适当降低张力防止其变形,同时应保持一定的张力作用,使预浸丝束在输送工艺过程中保证良好的舒展,实现稳定铺放。

1.4 丝束铺放专用模具

自动丝束铺放工艺是采用专用设备根据零件外形的需要完成复合材料的自动化铺叠过程。与手工铺层不同的是,铺放模具不仅应满足零件本身的制造需求,而且应该满足设备在完成自动化铺放工艺过程中对模具的特殊要求。丝束铺放模具需要为铺放过程提供成型曲面,保证铺放过程的顺利进行,同时还应满足铺放完成后的成型及固化、脱模需要。因此在实际铺放过程中可以分别采用铺放预成型模具和固化用模具 2 种模具形式,也可以采用铺放及固化共用同一模具的形式,2 种方式比较如表 3 所示。

表3 丝束铺放模具的差别

铺放 / 固化一体模具	铺放模具
模具铺放型面确定制件表面	模具固化模具型面确定制件表面
铺放及固化无差别	铺放及固化若有差别会导致褶皱
脱模或装卸时无制件变形	脱模或装卸时某些部分会变形
制备多个零件时,需要额外时间在设备上装卸模具	无需多次装卸模具
需要重新校准模具	无需重新校准
应用于任何形状制件的制备	脱模时不造成制件扭曲,不适于封闭截面

此外,自动丝束铺放工艺过程中的模具还包括辅助铺放工装、装卸工装、定位工装等,因此,适用于自动铺放工艺的工装均应考虑实际铺放设备的具体需求,围绕具体铺放设备的自身限制条件开展各类模具工装的设计及加工,最终实现模具工装与铺放设备间的良好匹配,保证铺放工艺的正常进行。

1.5 铺放控制软件

自动丝束铺放软件是铺放工艺过程顺利进行的的核心和关键,是保证硬件设备效能最大化发挥的关键。铺放控制软件主要包括 2 类:(1) 铺放运动控制类软件;(2) 轨迹规划及仿真软件。

1.5.1 运动控制类软件

运动控制软件的主要作用是按照程序代码的指令,完成铺放工艺过程中铺放设备的行进运动、升降运动、进给运动,以及铺丝头单元的各个关节运动控制,包括旋转运动、偏摆运动、俯仰运动等子动作,然后按照设定

的程序指令要求,完成自动铺放过程中预浸丝束的裁剪、输送、加持、重启等复杂运动的单独实现及组合动作,最终实现丝束铺放过程中的动作驱动,准确及时的按照设定的程序代码完成复合材料的自动化层铺过程。

此类控制软件大多与铺放设备本身集成。国外成熟的自动铺丝运动控制类软件主要是在传统数控机床的基础上改制而来,目前已经广泛应用,效果良好。而国内此类控制系统仅止步于实验室阶段,距离大规模工程化应用仍有较大距离。

1.5.2 轨迹规划及铺放仿真

自动丝束铺放工艺过程中,铺放设备主要的工作原理是通过读取铺放 NC 指令源代码完成复合材料制件的自动化层铺全过程。因此,铺放轨迹代码的正确及合理与否对顺利完成复合材料自动化丝束铺放工艺过程至关重要,是保证铺放硬件设备实现相应功能的根本与关键。

目前国内由于缺乏成熟的铺放设备,因此尚无成熟的商业化轨迹规划软件。国内轨迹规划软件仅在实验室级别,针对特定的铺放型面完成轨迹规划,铺放效果仍需不断的修正,目前尚无通用性及适用于工程化的相关软件。典型轨迹规划软件的主要作用是按照制件的铺层要求,完成自动丝束铺放轨迹规划的仿真、模拟及分析,最终生成适合于特定设备的铺放 NC 源代码,实现复合材料的自动化层铺工艺(图 3)。

束铺放设备,目前相关配套设备无法实现从国外直接引进,研究只能基于自主开发的丝束铺放设备进行。

自主开发的丝束铺放设备本身受限于国内机械数控加工的技术水平,铺放设备在运行平稳性、重复定位精度、机械整体装配、数控系统控制等方面存在较多问题,特别是在速度较快情况下,设备协调性、响应的及时性与准确性等方面仍需持续改进,目前的设备仅适用于在实验室开展相关领域研究,距离大规模的工程化应用仍有较大差距。

2.2.2 局部细节的拓展性

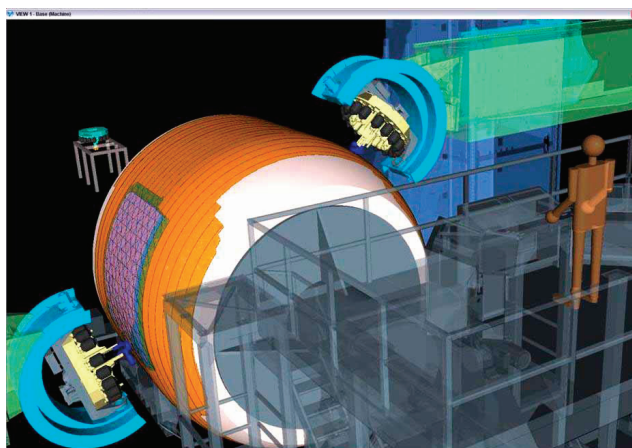


图3 典型自动铺丝轨迹规划及仿真
Fig.3 Typical programming and simulation of AFP

2 典型航空结构自动丝束铺放验证与存在的问题

2.1 典型航空结构自动丝束铺放验证

主要针对平板、曲面板、简单回转体结构及变截面回转体类结构开展了自动丝束铺放验证研究,如图 4~ 图 6 基本验证了自动丝束铺放工艺过程,但是在铺放材料的优化、铺放工艺参数的综合控制、铺放设备各个运动轴的调节、辅助配套工装的设计及应用、铺放轨迹的生成及测试等方面仍然存在不少的问题,仍需不断的改进。

2.2 现阶段自动丝束铺放工艺过程中存在的主要问题

截止目前为止,我们主要基于自动丝束铺放工艺系统开展铺放验证研究,存在的主要问题分析如下。

2.2.1 铺放设备的稳定性

开展复合材料自动丝束铺放工艺验证研究最基本的硬件条件是自动丝

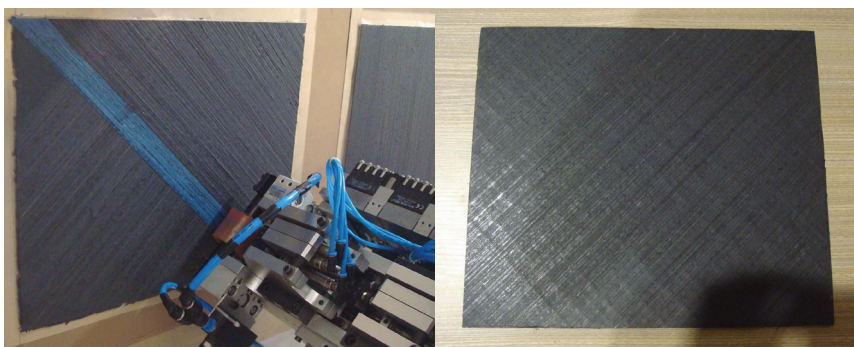


图4 自动铺丝平板验证
Fig.4 Pad laying-up of AFP

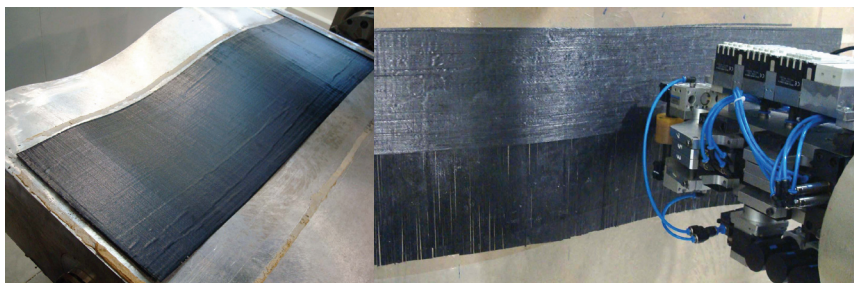


图5 自动铺丝曲面板验证
Fig.5 Curve pad laying-up of AFP



图6 变截面回转体类结构自动铺丝验证

Fig.6 Change section rotative structure laying-up of AFP

目前的原理样机从结构上已经基本可以重复实现自动丝束铺放的主要功能,如铺放工艺过程中预浸丝束的切断、重启、夹持及输送等环节,但是在实际铺放运行过程中还存在诸多其他问题。例如,丝束运行过程中故障率较高、丝束输送路径的合理性有待商榷、机械装配精度较低导致重复装配后的磨损问题、铺丝头部分选材未考虑到铺放实际情况(导致部分零件易于磨损)等方面仍需在实际应用的基础上结合使用经验持续改进,因此,应充分考虑实际应用效果及不足,铺丝头结构及装配的合理性与准确性仍有较大的改进空间。

2.2.3 铺放路径规划的合理性

国内自动丝束铺放软件目前尚无商业化成熟轨迹规划及仿真软件,部分国产轨迹规划软件在使用流畅性、准确性、兼容性等方面仍存在较多问题。国外复合材料自动丝束铺放工艺已日趋成熟,相应的丝束铺放轨迹规划软件已经实现商业化,但大部分铺丝软件与配套的铺放硬件设备相结合,生成的程序代码与相应的硬件设备相匹配,生成的加工代码仅供特定的机床使用。其他的离线式通用轨迹规划软件生成的代码应针对与国产设备的相容性、匹配性进行深入的研究与试验,以期获得良好的铺放效果。

2.2.4 控制系统的可靠型

控制系统是指铺放工艺过程中控制自动丝束铺放设备中各个运动轴综合运动的数控系统,工作原理主要是通过读取输入系统的控制指令,驱动各个独立运动轴按照预先设定的轨迹进行协调运动。目前,国内自动丝束铺放控制系统主要是沿用通用的多轴运动控制器进行控制,它的优点是灵活性较大、适合于实验室阶段进行研究,但是应用于工程化领域时,控制系统在可靠性方面与成熟的数控体系仍有较大的差距。

2.2.5 材料体系的适应性

预浸丝束是自动丝束铺放过程中的基本原材料,它与铺放设备本身的匹配性至关重要,丝束的适应性直接关系到铺放过程的顺利与否。国外已经针对丝束铺放工艺开发出配套的材料体系,保证丝束铺放工艺的顺利进行,减少铺放过程中的故障率。

由于目前国内缺乏相应的配套设备,尚未针对自动丝束铺放工艺系统开展材料体系的适应性研究,因此开展适应于自动铺丝工艺的材料体系仍然需要加大研究力度。

3 先进树脂基复合材料自动丝束铺放技术主要发展方向

3.1 一体化集成式发展

现阶段的复合材料自动化层铺工艺主要包括有自动铺带、自动铺丝,自动铺带的主要特点是效率高,但铺放的精度较低;而自动铺丝铺放精度较高,但是铺放效率较低。因此将这两种铺放工艺的优点集成成为近期的热点发展方向。

主要是指集成多种工艺优势,如自动铺带的高效率和自动铺丝的高精度,发展自动铺带和自动铺丝一体化机床,国外的 ElectroImpact、Ingersoll、MAG Cincinnati 等知名铺丝设备提供厂商已经开发了相应设备,极大地改善了高效率与高精度之间的矛盾。

3.2 软件的通用式发展

目前,国外的主要自动铺丝设备供应商针对不同的设备均配备有各自不同的轨迹规划及仿真软件,不同丝束铺放设备配套的软件生成的 NC 加工代码仅适合于特定的设备,彼此之间的通用性较差,不同设备间铺放软件制件的协调性较不理想,阻碍了不同设备间的协同利用效率,因此独立于铺放设备的自动铺丝轨迹规划软件会得到较大的发展。

离线自动铺丝软件独立于铺放设备,适用于不同的设备进行轨迹规划及仿真,可以实现不同设备间软件的通用性,大大提高铺放设备彼此间的协同配合效率,综合改善大规模集成设备的整体利用效率。

3.3 铺放材料的适应性增强

自动丝束铺放工艺过程的顺利实现很大程度上取决于铺放原材料适应性的好坏,特别是材料对于温度的敏感性要很好。例如预浸丝束在输送及退绕状态下应表现出极低的粘性和较高的刚性,而铺放时在温度的作用下应迅速提高粘性及柔性,因此积极开发铺放预浸丝束的适应性研究,增强铺放设备对不同材料体系的适应性,扩大自动铺丝工艺的应用范围,是大规模推动复合

(下转第 140 页)

强,当前端材料底部断裂点处的剪切应力超过材料剪强度极限时,发生剪切断裂,形成切屑,同时已加工面形成微坑。

2.3 刀具磨损分析

根据表 2 中数据可得不同纤维方向角 θ 下铣削加工时其刀具磨损量与切削力的对应关系,如图 6 所示。

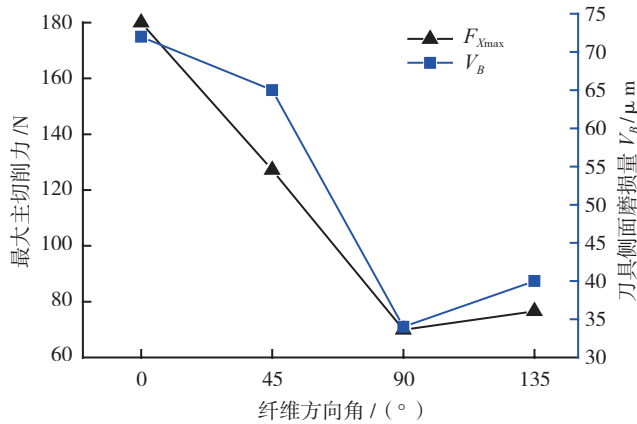


图6 不同纤维方向角铣削刀具磨损量与主切削力关系
Fig.6 Relation of wear of tool flank and maximum main cutting force on different fiber orientation angles

由图 6 可知,刀具磨损量和切削力是相互作用、相互关联的两个参量。同时可以得知,不同纤维方向角对刀具磨损作用由大到小依次为 $\theta=0^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$ 、 $\theta=135^\circ$ 和 $\theta=90^\circ$ 方向。分析认为刀具后刀面磨损主要由回弹的纤维对后刀面的摩擦造成。当纤维方向角为 $\theta=0^\circ$ 时,刀具对纤维层有压迫的切削分力,纤维层产生变形,切削时刀具离开,纤维层恢复形状,对后刀面产生挤压摩擦,而 0° 纤维的回弹量最大,故该层纤维处刀具的后刀面磨损最大。其他纤维方向角对刀具的摩擦规律同理可解释。

3 结论

(1) 在碳纤维复合材料层合板铣削加工时,纤维方向角 θ 对切削力和切削比能有一定的影响。

当纤维方向角 $\theta \geq 90^\circ$,其切削性能要优于 $\theta < 90^\circ$ 时,纤维方向角 $\theta=90^\circ$,其切削性能最优;纤维方向角为 0° 时,其切削性能最差。

(2) 纤维方向角 θ 是影响碳纤维复合材料层合板铣削加工表面质量的重要因素。通过对切口形貌及粗糙度的分析,纤维方向角 $\theta=45^\circ$ 时,其已加工表面质量最好;当纤维方向角 θ 为 135° 时,其已加工表面质量最差。即,当切削方向顺着纤维铺层方向时,其切口质量较好,而当切削方向逆着纤维铺层方向时,其切口质量较差。

(3) 在碳纤维复合材料层合板铣削加工时,不同纤维

维方向角 θ 对刀具磨损作用不一样。磨损量由大到小依次为 $\theta=0^\circ$ 、 $\theta=45^\circ$ 、 $\theta=135^\circ$ 和 $\theta=90^\circ$ 。

(4) 在碳纤维复合材料层合板铣削加工时,应综合考虑纤维方向角对切口质量和刀具寿命影响,尽量使刀具切削方向垂直于纤维方向进行,且避免逆切情况。

参考文献

- [1] Koplev A, Lystrup A, Vorm T. The cutting process, chip and cutting forces in machining CFRP. Composite, 1983, 14(4):371-376.
- [2] 花崎伸作. CFRP 切削における工具摩耗机构. JSME C 编. 日本机械学会论文集. 日本: 日本机械学会, 1994, 60 (1):297-302.
- [3] 张厚江, 陈五一, 陈鼎昌. 碳纤维复合材料切削机理的研究. 航空制造技术, 2004(7):57-59.
- [4] 张秀丽, 谢朝晖, 张恒. 纤维方向对复合材料加工质量影响的试验研究. 中国机械工程, 2009, 20(21):2617-2620.
- [5] Gong Y H, Yang N H, Shu H, et al. Surface morphology in milling multidirectional carbon fiber reinforced polymer laminates. Advanced Materials Research, 2013(683): 158-162. (责编 日午)

(上接第 136 页)

材料自动化生产的重要因素。

4 未来趋势展望

自动丝束铺放技术是目前先进的低成本复合材料构件制造技术,它极大地发挥了复合材料的优势,如可设计性好、易于整体成型等,但是目前由于缺乏成熟的丝束铺放工艺设备,无法为丝束铺放系统提供良好平台,加之相关设备的限购,极大地增加了该项工艺研究的难度。因此,我们必须立足现有设备,积极积累相关工艺经验,为将来丝束铺放工艺大规模工程化应用奠定良好的技术基础。

参考文献

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天. 复合材料学报, 2007, 24(1):1-12.
- [2] 肖军, 李勇, 李建龙. 自动铺放技术在大型飞机复合材料结构件制造中的应用. 航空制造技术, 2008(1):50-53.
- [3] 肖军, 李勇, 文立伟, 等. 树脂基复合材料自动铺放技术进展. 中国材料进展, 2009, 28(6):28-32.
- [4] 邵冠军, 游有鹏, 熊慧. 自由曲面构件的纤维铺放路径规划. 南京航空航天大学学报, 2005, 37 (S1):144-148.
- [5] 党旭丹, 肖军, 还大军. 自动铺丝平行等距轨迹规划算法实现. 武汉大学学报, 2007, 53(5):613-616.
- [6] 林福建. 自由型面复合材料零件铺放束成型轨迹规划 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- [7] 李善缘, 王小平, 朱丽君. 复合材料铺丝成型中的路径规划. 宇航材料工艺, 2009(2):25-29.
- [8] 周焱. 复合材料自动铺丝 CAD 技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006. (责编 亦非)