

复合材料自动铺丝设备研究现状*

王显峰,张育耀,赵 聪,肖 军

(南京航空航天大学材料科学与技术学院,南京 210016)

[摘要] 自动铺丝成型工艺因其高质量、高效率、高成型适应性、低废料率等工艺特点,特别适用于大型复杂复合材料构件的自动化成型,如机身、进气道、承力锥、翼身融合体等。从床身形式、纱箱系统、铺丝头结构等角度展开,总结了自动铺丝成型设备的发展现状,分析了现阶段国内相关的研究成果与应用现状,最后对自动铺丝成型设备未来的发展趋势进行了展望。

关键词: 先进复合材料; 自动化成型工艺; 自动铺丝; 铺放设备; 模块化设计

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.14.083



王显峰

副教授,从事缠绕、铺带、铺丝等复合材料自动化成型技术研究。先后主持国家级项目 5 项,参与国家级、省部级项目 10 余项,发表论文 20 余篇,获授权国家发明专利 10 余项,曾获国家科技进步二等奖 1 项、省科技进步二等奖 1 项。

先进复合材料具有轻量化、高强度、高模量、结构功能一体化和设计制造一体化、易于成型大型构件等优点,在航空航天工业中起着非常重要

* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2014CB046501)。

的作用,是理想的结构用材。国外军机上复合材料的用量普遍占结构重量的 25%~50%; 在民用领域,波音 787 飞机的复合材料用量达到 50%,而空客 A350 复合材料用量更是达到了创纪录的 52%^[1-3]。复合材料用量的大幅提升,离不开自动铺放设备的支持。自动铺放技术根据预浸料形态的不同可分为自动铺带技术和自动铺丝技术。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^[4-6]。

与自动铺带技术相比,自动铺丝技术使用多组预浸纱,具备增减纱束根数的功能,可便捷地根据构件形状进行自动切纱,且各预浸纱独立输送,铺放轨迹自由度高,适用于大曲率复杂构件成型。因此该技术具有生产成本低、生产效率高、成型适应性强等优势,目前已

成为大型复杂复合材料制造的典型工艺。

自动铺丝成型装备发展

典型的自动铺丝设备如图 1 所示,主要由机床主体、纱架系统、铺丝头 3 部分组成。机床主体的主要功能是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、滚压等功能,将丝束铺放在模具上^[7-9]。

1 机床主体

根据机床主体的不同可将自动铺丝设备区分为立式铺丝机、卧式铺丝机、龙门铺丝机。立式与卧式的不同主要在于驱动芯模转动的旋转坐标轴的不同,若为芯模旋转工作台则称之为立式,若为芯模旋转轴则称之为卧式^[10],图 2 即为典型的卧式自动铺丝机。典型的龙门式自动铺丝机如图 3 所示,通常为两排立柱固定在地基上,每排立柱上具有两条 X 向导轨,横梁在导轨上做 X 向运动,横

滑板在横梁上做 Y 向运动,垂滑枕在横梁上做 Z 向运动^[11]。立式与卧式自动铺丝设备同为机床结构,设备使用寿命长且铺放精度高,目前已是机身结构铺放不可或缺的设备。龙门式自动铺丝机主要适用于小曲率壁板、翼面等非回转构件^[12],具有结构宽度大、行程长、运行速度快等优点,但设备成本高于卧式铺丝设备。

不同结构与形状的铺丝机具有不同的特点,自然也适用于不同类型结构部件的制造。在空客 A350 的制造过程中,大型机身曲板结构的自动铺丝工作由立式自动铺丝机完成,通过将工件固定在固定区域,不需要旋转工件即可实现机身、机翼等长度较长的部件的自动铺丝工作。而飞机的机身筒体直径长达 6m,需要对该工件其进行旋转,因此铺丝头在工装的一侧进行铺放效率更高,在这种情况下卧式自动铺丝机更适宜完成自动铺丝工作^[13]。

2 纱架系统

根据丝束料卷与铺丝头的相对位置,可将自动铺丝设备分为长传纱型铺丝机(图 4)与直传纱型铺丝机(图 5)。长传纱型铺丝机为早期典型的自动铺丝机的结构形式。这一结构的自动铺丝设备将料卷存放与纱架中,纱架放置在铺丝机的横梁或附近,预浸丝束通过长距离传输运动的铺丝头进行铺放。由于纱架容纳体积大,料卷体积不受限制通常铺放长度可达 5000m,非常适用于大型结构部件的铺放工作。采用长距离传输铺丝有一定的缺点,比如材料的上下料时间较长、出现断纱的概率较高、人工维护设备的时间和成本也较高。

长传纱型自动铺丝设备并不完美,为了减少丝束传输距离、降低传输过程中断纱的概率,Electroimpact (EI)、M-Torres、MAG、INGERSOLL 等公司先后开发了直传纱型铺丝机。他们通过设计将料卷与铺丝头结合

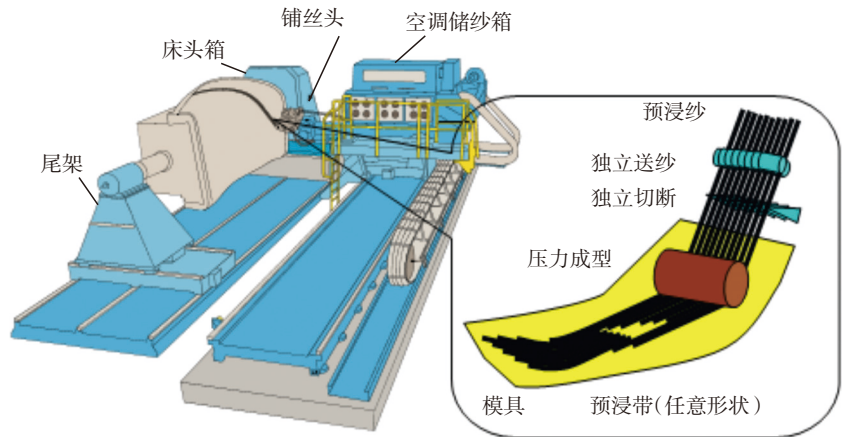


图1 典型自动铺丝设备

Fig.1 Typical automatic fiber placement equipment



图2 辛辛那提卧式自动铺丝机
Fig.2 Cincinnati horizontal automatic fiber placement machine



图4 Coriolis长传纱式纱箱铺丝机
Fig.4 Coriolis fiber placement machine with long fiber pass

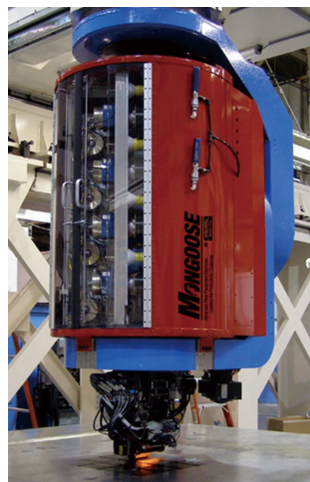


图3 M-Torres龙门式铺丝机
Fig.3 M-Torres vertical fiber placement machine

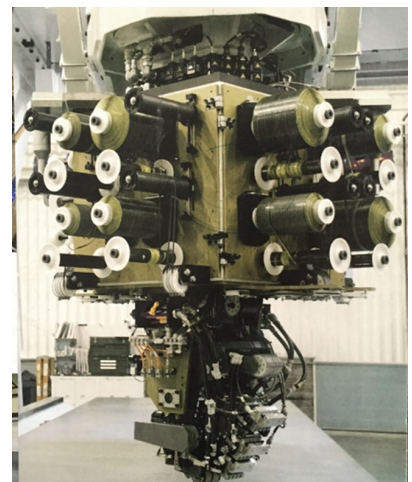


图5 辛辛那提直传纱式纱箱铺丝机
Fig.5 Cincinnati fiber placement machine with short fiber pass

在一起,如此就达到了避免因传输距离长而出现丝束接头断开的风险。直传纱型铺丝机由于料卷与铺丝头一体,因此料卷体积受到限制,大尺寸料卷较难安装在铺丝头上,料卷铺

放长度减少,通常仅有 1500~2000m。为了解决因料卷长度减少而带来的频繁上下料的问题,EI 公司同时开发了可更换铺丝头技术。当筒料卷用完即可更换新铺丝头继续铺放工

作,因此铺放工作效率大幅提高^[14]。目前,主流复合材料铺丝设备供应商都开发了图6所示的该项技术。

3 铺丝头

铺丝头是自动铺放设备的核心部件,目前世界上已开发出如图7所示多种结构的自动铺丝头。典型的自动铺丝设备铺丝头一般包括送进、夹紧、剪切、重送、加热、滚压等装置,以此实现自动铺丝设备的各项铺放工作。

(1)剪切装置:该装置能够在纤维铺放过程中,对任意纤维束进行切断、调用,因此允许通过增加或减少纤维束的数目来改变铺放纤维束带的宽度和构成形式。通过对纤维束带宽度的调整可控制相邻带间裂缝或相互交叠覆盖区的大小。

(2)夹紧装置:由于纤维束具有

张力,对某一纤维束进行剪切时需要夹住后面的纤维束,以防其被回收导致不受控制。当要求剪切纤维束前执行夹紧动作,要求重送纤维束时,断开夹紧方式。

(3)重送装置:当需要被切断的纤维束重新铺放到工件模具表面时,可通过执行重送装置实现。

(4)滚压装置:纤维束需要通过滚压辊压实以保证纤维束可紧贴在工作表面,这一工作就由滚压装置实现。其中,压紧压力可通过编程控制。

(5)加热装置:此装置用于控制纤维束的黏度,以保证滚压装置能够有效压紧纤维束并挤走层间空气。典型自动铺放设备的加热装置可控制纤维束升温(27~32℃)产生必要的黏度,并由滚压辊压紧在工作表面。在此之前纤维束温度需保证

不高于21℃,才能使纤维束保持在低黏度或无黏度状态,从而能够无障碍地从纱架系统中抽出并传送至铺丝头^[15]。目前应用在纤维铺放中的热源主要有激光热源、红外线热源和高温热源3种^[16]。激光热源具有加热时间短的优势,但是受自身价格高昂、质量与体积较大等不利因素的限制,主要适用于对加热空间与成本没有限制的场合;当要求成本尽量低且对加热时间没有严格要求时,红外线热源加热方式具有不可替代的优势;高温气体热源加热方式主要应用于加热时间较短同时加热空间比较小的场合,高温热源缺点在于能量利用率低^[17]。国外还对热流体加热源展开了相关研究,热流体热源最大的优点是可以进行循环利用,极大提高了热源的热利用率,但是由于可实施性较差,故尚未得到广泛使用^[18]。在实际铺丝工作中,主要以激光热源、红外线热源、高温热源的优缺点作为参考,从中选择合适的加热工艺。目前,对于热固性基体复合材料的铺放多采用红外加热的方法进行加热(图8)。

典型的铺丝头主要由上述装置构成,但出于降低成本、提高效率的目的,大多数自动铺丝设备采用了将不同宽度规格的铺丝头集成在一台铺丝设备上,一次实现不同规格的铺丝加工。这在一定程度上解决了工件复杂度与高铺丝效率之间的矛盾。

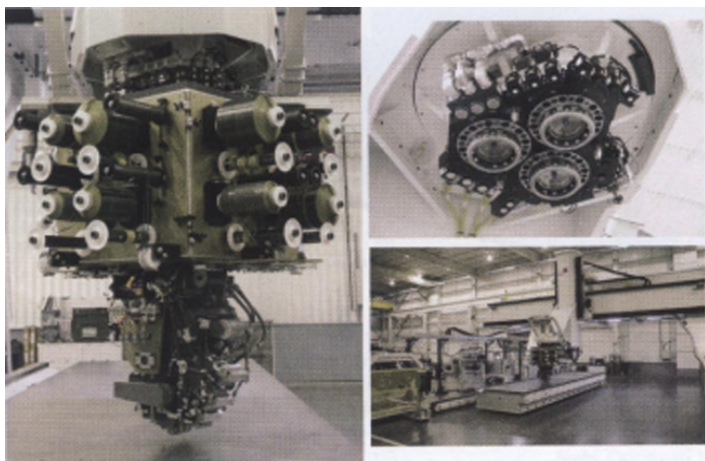


图6 可整体更换铺丝头的铺丝机
Fig.6 Fiber placement machine with removable head

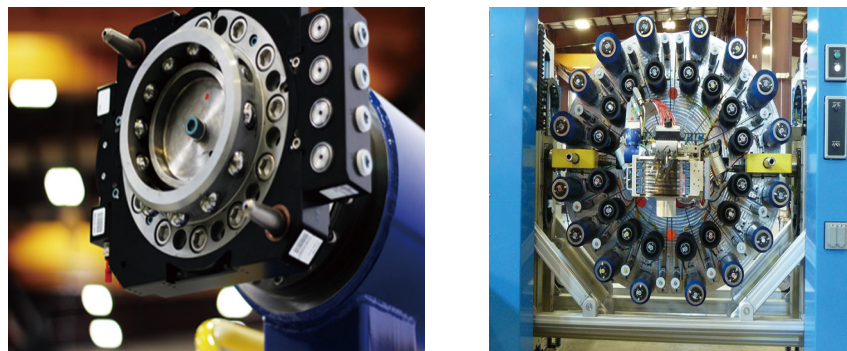


图7 多种结构的铺丝头
Fig.7 Several kinds of fiber placement head



图8 采用红外加热热源的自动铺丝机
Fig.8 Fiber placement machine with infrared heating source

但是由于使用的纤维束宽度与数量不同,导致其复合材料工件制造复杂度与铺放生产率难以兼顾。美国的EI公司在2003年开发了一种新概念模块化铺丝头(图9),并通过设计可交换的模块化铺丝头的自动铺丝设备解决上述问题。这种设备将所有铺丝中所需要的纤维束料放置在模块化铺丝头上,取消了传统铺丝机中的纱架系统。同时,这个模块化铺丝头与控制它的铺放平台是分离的,可通过更换铺丝头实现提高效率的目的^[19]。如此,也能通过一台基础机床和多个铺丝头满足复杂工件的不同纤维铺放需求。

除此之外,EI公司通过对铺丝头进行模块化设计实现了进一步减少纤维束传送时间、提高铺放效率的目的。EI公司的模块化自动铺丝头除了拥有典型铺丝头的剪切模块、送料模块、夹紧模块外,还在铺丝头上安装了双向丝束蹼,以此实现双向铺放的功能,如图10所示。在这方面,

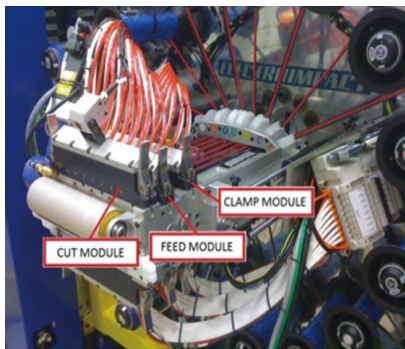
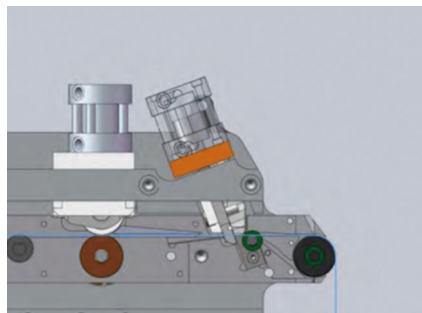
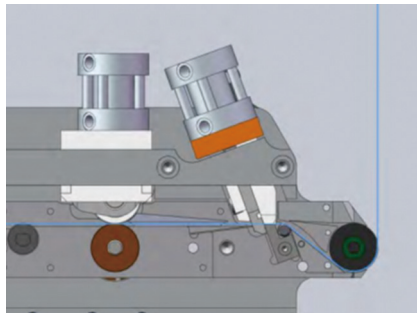


图9 模块化铺丝头

Fig.9 Automatic fiber placement head



(a) 正向铺放



(b) 逆向铺放

图10 双向铺放

Fig.10 Two-way placement

南航也开发了如图11所示的新型双向铺丝头。蹼是一个很小的气动门,通过在刀具与压辊之间加入蹼装置,当打开双向铺放时,蹼可允许纤维束不受打断的送入压辊,关闭时则可将纤维束送到压辊的另一侧^[20]。为了实现这种路径改变的目的,需要在刀具前加一个额外的导辊。在模块化铺丝头中,由于纱架系统与铺丝头已经整合在一起,这意味着纤维束牵引路线并不需要随着机器的运动而自我调整。同时,各轴不会因为纤维束牵引路线而受到限制,这意味着,当铺丝头取向自由时,仅有机器驱动以及性能限制才会导致铺丝头的运动极限。这也使得铺丝头设计能够从机床主体的设计中分离,从而在保证铺丝头的耐久性、精确性下能够设计宽角度的机床。

模块化铺丝头的优点在于,可以通过在铺丝头背部附加的一个刀具适应接口将此模块化铺丝头替换至另一个铺丝头,此时在同一个工件上不同尺寸纤维使用不同的铺丝头铺放不再需要进行额外的设置,相同的铺丝头也能在不同铺丝设备间使用、替换。此外,当模块化铺丝头与刀位点程序相结合,当机床具备生产工件所需的体积与角度范围,则工件可在任一机床进行生产^[21]。

4 机器人平台

随着时代发展,工业机器人在制造业的许多领域中得到了广泛应用。多腕关节结构的工业机器人在其工

作半径内对位置控制具有较大柔性。一些自动铺丝设备供应商利用多自由度(通常6自由度以上)工业机器人系统为作为运动平台配置模块化铺丝头来构建低费用高生产率的复合材料自动铺丝设备,图12即为EI公司开发的一款机器人用铺丝头。美国复合材料系统公司推出一种以6自由度运动控制的Motoman UP200机器人为平台的自动铺丝设备。这台铺丝机器人可以安装在滑轨装置上,或者可以倒装在三坐标运动控制的龙门系统上,实现这种倒挂铺放的功能是其他典型铺丝设备难以实现的。Groppe航空公司计划将其运用在空心复合材料涡轮叶片的制造工作中。我国在以工业机器人平台构建自动铺丝设备方面也有一定成果,哈尔滨工业大学的富宏亚课题组^[22]以3P-3R型机器人为平台,该平台由3个正交的移动坐标轴与

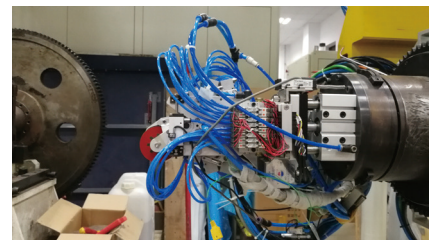


图11 南航研制的新型双向铺丝头

Fig.11 New designed two-way placement head from NUAA

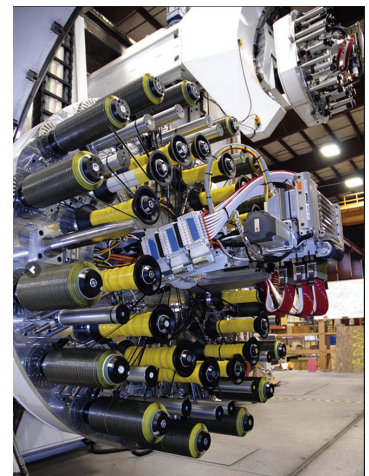


图12 EI公司研发的机器人用铺丝头

Fig.12 Placement head from EI company

3个转动坐标轴的球形手腕组成,具有4束纤维束控制和铺丝能力的铺丝头安装在手腕末端;这种铺丝设备的结构设计充分利用了机器人手臂工作范围大、灵活度高的特点,提高了铺丝头在可达空间范围的姿态控制能力,主轴的旋转自由度为加工管状零件提供了可能性。通过使用如图13所示的工业机器人作为铺丝平台,成本低于龙门式结构,但是由于机械臂的刚性不足,因此机器人铺丝设备不适于生产制造大型结构部件,更适于生产小尺寸、复杂结构的复合材料工件。

国内研究现状

国内对自动铺放技术的研究起步较晚,南京航空航天大学在“九五”期间率先开始研究自动铺放成型技术。武汉理工大学、哈尔滨工业大学、天津工业大学等单位也先后在自动铺放技术领域进行了相关研究。

南京航空航天大学与上海万格复合材料有限公司合作完成了国内第一台8丝束预浸纱铺放试验系统及铺丝用精密低张力测控系统,开发了基于CATIA的自动铺丝CAD/CAM软件原型,形成了自动铺丝技术与基础设备的技术储备^[23]。之后,南航又针对自动铺丝轨迹规划进行

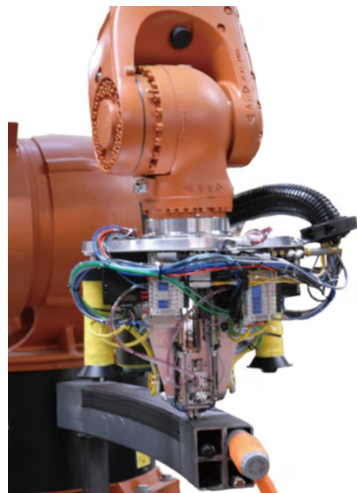


图13 以机器人作为平台的铺丝设备
Fig.13 Robot fiber placement platform

了深入研究,党旭丹^[24]、王念东等^[25]提出了一系列自动铺丝路径生成算法,其中,王念东提出的针对管状构件的以母线为参考线自动铺丝路径算法经由飞机S型进气道的应用验证了其正确性。2010年,南航完成了两型高柔性8丝束铺丝机的研制工作。自2013年以来,南航已完成16丝束直传纱型铺丝机、24丝束长传纱型尾锥铺丝试验机、8丝束直传纱型机器人铺丝机(图14)的制造工作,完成了火箭舱段、卫星承力筒、尾锥试验件等构件的铺丝工作,实现了自动铺丝技术的基本工业化应用。

武汉理工大学在自动铺放成型的数控系统、成型机构等方面展开了



(a) 16丝束直传铺丝机



(b) 8丝束机器人铺丝机



(c) 24丝束卧式长传铺丝机

图14 南航研制的3种自动铺丝设备
Fig.14 Placement machines designed by NUA

相关研究。2003年,于传浩等对铺放头进行了结构设计。2005年,田会方等^[26]针对圆锥体铺丝工作设计了8轴自动铺丝机。2006年,田会方等^[27]完成了如图15所示的丝束铺丝原理样机研制工作,从自动铺丝装备构型分析、控制系统及铺丝间隙检测等方面展开了基础研究。

哈尔滨工业大学则以原有的6轴缠绕机为基础进行技术改造,设计了一种7轴纤维铺放头,提出了对应的控制方案并对数控铺放系统开展了研究^[28]。2007年,富宏亚课题组^[29-31]研制了如图16所示的4丝束铺丝原理样机,完成了对铺丝仿真、张力控制方法、工艺缺陷等的基础研究。

西安交通大学段玉岗等^[32]于2008年以六轴机器人平台,研制出了8丝束、16丝束铺丝机器人(图17),对铺丝头、铺丝工艺影响因素等展开研究,开辟了国内低成本铺丝的新方向。

目前中航复材公司、上海飞机制造厂、中国商飞北研中心等通过进口的方式也拥有了自动铺丝机,并已经



图15 武汉理工大学研制的铺丝原理样机
Fig.15 Placement machine from WUT



图16 哈工大研制的4丝束原理样机
Fig.16 Placement machine with 4 fibers designed by HIT

陆续开展了相应构件的自动铺丝试制的工作。图 18 即为中航复材利用自动铺丝成型技术制备的 C929 全尺寸复合材料壁板工艺件。

总而言之,我国在自动铺放设备研制、生产和工业应用方面还处于起步阶段,大量基础研究工作与实际应用之间的转化尚未完成。只有形成技术规范完整的技术流程,才能实现自动铺丝工业化应用。

结论

复合材料日益广泛的运用对自动铺放设备提出了一定的要求,其中,自动铺丝技术作为在航空航天等制造业的重要工艺,对设备提出了更高的要求。我国在这一方面尚处于起步阶段,虽然有一定的成果但是相对于国外的先进水平尚有较大差距。目前我国正在实施大飞机项目,对大型自动铺丝设备的重视程度已有所提高。在今后发展中,以下几点值得关注:

(1) 铺放设备专门化的趋势: 产品的专用铺放设备发展迅速,这不仅



图17 西安交通大学研制的16丝束铺丝机器人
Fig.17 Placement machine from XJTU

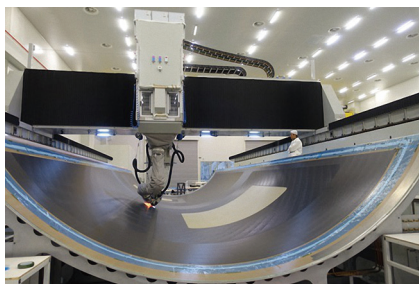


图18 铺丝成型中的蒙皮壁板
Fig.18 Covering panel in fiber placement

降低了使用成本还提高了装备的使用效率,尤其是采用机器人为平台的铺放设备,能够大幅降低装备成本。比如 Enate 公司开发的用于民用风力涡轮发电机复合材料叶片制造的自动铺丝机床使用的是 150K 独立长纤维组成的纤维束,与典型自动铺丝设备使用的 3~12K 不同。

(2) 双头铺放、多头铺放工艺的应用: 例如美国 Dallas 工厂的大型双龙门双铺放头可一次铺放两个零件,或者在铺放一个零件时同时可进行另一个铺放零件的加载或卸载。EI 公司设计的具有多个可交换模块化铺丝头的自动铺丝机床的方法,也解决了铺放生产率与零件复杂度的矛盾问题,这种机床可将所有需要的不同规格的纤维束束放置在多个模块化铺丝头上,在需要交换不同规格的丝束时,可进行类似传统数控机床的“换刀”操作将需要的铺丝头快速交换至铺放位置。由此可见,双头铺放工艺、多头铺放工艺是提高生产率的一个研究重点。

(3) 双向铺放工艺的应用: 在铺丝工作中尽量避免空程运行也是提高生产效率的一个有效方法。本文所提到的 EI 公司在模块化铺丝头上安装双向丝束蹼装置后,能够使铺丝头实现正向、逆向的铺放工作。

(4) 针对热塑性复合材料开发的自动铺丝设备: 热塑性复合材料具有良好的可循环性、抗冲击韧性、抗化学腐蚀性以及保质期长等优点,具有广泛的应用前景。若将热塑性复合材料与自动铺丝技术相结合,可显著降低生产成本与缩短加工时间。由于在铺丝过程中的温度变化对热塑性复合材料构件的成型质量有较大影响,因此进一步研究复合材料铺放过程中温度场的分布对促进热塑性自动铺丝设备的开发具有重大意义。

希望国内继续加大对相关产业的支持力度,引入高端自动铺丝技术

与装备,同时加大对材料和工艺工程化的应用研究,早日将自动铺丝技术大量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.
- [2] WANG Ping. Application of composite material in large civil airplanes[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2008(3): 12-18.
- [3] 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, 51(10): 54-57.
- [4] 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, 51(10): 54-57.
- [5] 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.
- [6] ZHANG Xiaohu, MENG Yu, ZHANG Wei. The state of the art and trend of carbon fiber reinforced composites[J]. Fiber Composites, 2004, 30(1): 50-58.
- [7] 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.
- [8] YANG Naibin. Composite structures for new generation large commercial jet[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 596-604.
- [9] MARSH G. Air framers exploit composites in battle for supremacy[J]. Reinforced Plastics, 2005, 49(3): 26-32.
- [10] 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.
- [11] LI Dongsheng. Present and future of large passenger aircraft composite structure[C]// Composites: Innovation and Continuous Development (Volume One). Beijing: China Science and Technology Press, 2010.
- [12] 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.
- [13] 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 & Market, 2009(4): 84-89.
- [9] 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 wire laying technology in aviation industry [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 1997(9): 11-13.
- [10] 李勇, 肖军. 复合材料纤维铺放技术及其应用[J]. 纤维复合材料, 2002, 37(1): 39-41.
- LI Yong, XIAO Jun. Fiber laying technology of composite materials and its application[J]. Fiber Composites, 2002, 37(1): 39-41.
- [11] 杨会芳, 李中凯, 金辉. 大型复合材料丝束铺放机关键部件结构分析[J]. 航空制造技术, 2010, 53(22): 72-75.
- YANG Huifang, LI Zhongkai, JIN Hui. Analysis of key component of large composites fiber placement machine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(22): 72-75.
- [12] 张建国. 复合材料自动铺带控制及工艺关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- ZHANG Jianbao. Research on the key control and processing technology of composites automated tape placement[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [13] 郑广强, 姚锋, 周晓芹. 自动铺丝技术及其在 A350 制造过程中的应用[J]. 航空制造技术, 2017, 60(16): 76-82.
- ZHENG Guangqiang, YAO Feng, ZHOU Xiaoqin. Application of automatic fiber placement technology in A350 manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(16): 76-82.
- [14] 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>.
- [15] 孙年俊. 复合材料自动铺放设备[N]. 中国航空报, 2014-11-20(T02).
- SUN Nianjun. Automatic layup equipment for composite materials[N]. China Aviation News, 2014-11-20(T02).
- [16] 韩振宇, 李明华, 富宏亚, 等. 热塑性复合材料纤维铺放工艺的研究进展[J]. 材料工程, 2012(2): 91-96.
- HAN Zhenyu, LI Yuehua, FU Hongya, et al. Thermoplastic composites fiber placement process research[J]. Journal of Materials Engineering, 2012(2): 91-96.
- [17] KLASUS D F. KARL V S. A new compact robotic head for thermoplastic fiber placement[C]//Proceedings of 38th SAMPE Symposium. Pairs: SAMPE, 1993: 138-151.
- [18] SHIH P J. On-line consolidation of thermoplastic composites[D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
- [19] 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(下)[J]. 世界制造技术与装备市场, 2009(6): 78-83.
- LIN Sheng. ATL/AFP—The key machine for manufacturing of modern large airplane (C)[J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2009(6): 78-83.
- [20] ROWER J. Robot driven automatic tapehead for complex composite lay-ups[EB/OL]. [2018-03-15]. https://www.electroimpact.com/WhitePapers/Robot_Driven_Automatic_Tapehead_For_Complex_Composite_Lay-ups.pdf.
- [21] STAMEN J, RUDBERG T, JAHNER B. Automated layup of high-angle-range carbon composite parts with static tools[EB/OL]. [2018-03-15]. <https://www.electroimpact.com/WhitePapers/HighAngleRangeParts.pdf>.
- [22] 富宏亚, 邵忠喜. 七自由度纤维铺丝样机研制[J]. 航空制造技术, 2010, 53(17): 46-48.
- FU Hongya, SHAO Zhongxi. Development of the 7-DOF fiber placement sample machine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(17): 46-48.
- [23] 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[J]. 航空制造技术, 2008, 51(1): 50-53.
- XIAO Jun, LI Yong, LI Jianlong. Application of automatic layup technology in the manufacture of large aircraft composite material structural parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(1): 50-53.
- [24] 党旭丹, 肖军, 还大军. 自动铺丝平行等距轨迹规划算法实现[J]. 武汉大学学报(理学版), 2007, 53(5): 613-616.
- DANG Xudan, XIAO Jun, HUAN Dajun. Implementation on fiber placement parallel equidistant path generation algorithm[J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2007, 53(5): 613-616.
- [25] 王念东, 刘毅, 肖军. 复合材料管状结构自动铺丝路径算法[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2008(2): 228-233.
- WANG Niandong, LIU Yi, XIAO Jun. Fiber-placement path design for composite structures in pipe-form[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2008(2): 228-233.
- [26] 田会方, 黄亚辉. 纤维铺放机的机构设计及仿真[J]. 机械工程师, 2005(8): 92-94.
- TIAN Huifang, HUANG Yahui. The mechanism design and simulation of fiber laying machine[J]. Mechanic Engineer, 2005(8): 92-94.
- [27] 田会方, 吴猛. 纤维带铺放控制系统的设计研究[J]. 机械工程与自动化, 2008(2): 135-137.
- TIAN Huifang, WU Meng. Research and design of control system for fibre tape placement[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2008(2): 135-137.
- [28] 韩振宇, 邵忠喜, 路华, 等. 七自由度四丝束纤维铺放机及数控系统的开发[J]. 材料工程, 2009(S2): 211-215.
- HAN Zhengyu, SHAO Zhongxi, LU Hua, et al. Development of 7-DOF four tow fiber placement machine and CNC system[J]. Journal of Materials Engineering, 2009(S2): 211-215.
- [29] 韩振宇, 王志斌, 路华, 等. 一种新型自动铺丝张力控制系统的研制[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(5): 4-8.
- HAN Zhenyu, WANG Zhibin, LU Hua, et al. The development of a new tension control system for automated fiber placement machine[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(5): 4-8.
- [30] 韩振宇, 李明华, 富宏亚, 等. 锥壳零件自动铺丝变角度轨迹规划算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(3): 400-405.
- HAN Zhenyu, LI Yuehua, FU Hongya, et al. Variable-angle trajectory planning algorithm of automated fiber placement for conical

shell[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(3): 400-405.

[31] 韩振宇, 王振宇, 边东岩, 等. 自动铺丝构件缺陷形成机理的研究进展[J]. 纤维复合材料, 2014, 31(4): 3-7.

HAN Zhenyu, WANG Zhenyu, BIAN Dongyan, et al. A review on advances in defect

formation mechanism of automated fiber placement components[J]. Fiber Composites, 2014, 31(4): 3-7.

[32] 段玉岗, 刘芬芬, 陈耀, 等. 纤维铺放压紧力及预浸带加热温度对复合材料力学性能的影响[J]. 复合材料学报, 2012, 29(4): 148-156.

DUAN Yugang, LIU Fenfen, CHEN Yao, et al. Effects of compaction force and heating temperature of prepreg on composite mechanical properties during fiber placement process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(4): 148-156.

通讯作者: 王显峰, E-mail: wangxf@nuaa.edu.cn.

Research Status of Automatic Fiber Placement Equipment for Composite Materials

WANG Xianfeng, ZHANG Yuyao, ZHAO Cong, XIAO Jun

(College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] As its high quality, high efficiency, high molding adaptability and low scrap rate, automatic fiber placement process is especially suitable for the automatic manufacture of large complex composite components, such as fuselage, inlet, bearing cone, blended wing body. In this paper, the developments of automated fiber placement equipment were reviewed, from the perspective of lathe bed, tow storage box, placement head. Moreover, research and application status of automated fiber placement equipment in China was analyzed. Finally, the future of placement equipment was predicted.

Keywords: Advanced composites; Automated manufacture process; Automated fiber placement; Layup equipment; Block design (责编 逸飞)

(上接第78页)

Impregnation Model and Research Progress of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic Prepregs Prepared via Hot Melting Method

LI Xuekuan, ZHAO Yan, WANG Kai, CHEN Junlin, SONG Jiupeng

(College of Material Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] The excellent mechanical properties, wide usage temperature range and secondary processing possibility make continuous fiber reinforced thermoplastic prepreg develop rapidly. The hot-melt method is an accurate and efficient thermoplastic prepreg molding method. It is an engineering problem that needs to be solved that how to achieve the uniform and full impregnation of continuous fiber bundles with high viscous resin melts, such as PPS, PEEK and so on. Firstly, based on Darcy's law, four impregnation theoretical models were proposed, which fully consider the effects of process temperature, pressure, processing stage and shape of fiber bundles on impregnation, and they can provide theoretical guidance for the establishment of continuous fiber reinforced thermoplastic prepreg production lines and the determination of process parameters. Then the research and industrialization status of domestic and foreign continuous fiber reinforced thermoplastic prepreg are compared: foreign related industries have a wide range of prepregs, which have been widely used in military aircraft, civil aircraft and other fields, but foreign company have a strict purchase policy for China. Domestic demand for continuous fiber reinforced high performance thermoplastic prepreg is in short supply. Beihang thermoplastics group has independently developed a continuous fiber reinforced high performance thermoplastic prepreg production line via hot melting method, which has eased domestic urgency to some extent.

Keywords: Continuous fiber reinforced thermoplastic prepreg; Hot melting method; Impregnation theoretical model; Newtonian fluid; Navier-Stokes equation (责编 逸飞)