

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.05.003

中国复合材料自动铺放技术研究进展

文立伟 肖军 王显峰 齐俊伟 王跃全 李勇 还大军

(南京航空航天大学材料科学与技术学院,南京,210016)

摘要:首先扼要介绍了复合材料自动铺放(自动铺带和自动铺丝)成形技术的原理、特点和该技术在海外航空航天领域的应用概况。然后系统介绍了近年来中国国内复合材料自动铺带的装备技术、软件技术和材料工艺技术的研发历程,总结了其关键技术的突破和应用进展,并指出开发低成本高效铺带技术是未来的重要方向。同时介绍了国内自动铺丝技术基础研究(装备、软件和工艺方法)的进展,并且着重介绍了南京航空航天大学自动铺丝应用技术(工业样机与材料工艺技术)的研发和应用情况。最后通过分析,归纳了自动铺丝技术应用研究的瓶颈问题,并提出了研究建议。

关键词:先进复合材料;大型飞机;自动铺带;自动铺丝

中图分类号:TQ32214;TB332

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2015)05-0637-13

Progress of Automated Placement Technology for Composites in China

Wen Liwei, Xiao Jun, Wang Xianfeng, Qi Junwei, Wang Yuequan, Li Yong, Huan Dajun

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

Abstract: The manufacture principle of automated placement, including tape laying and fiber placement, and its advantages and applications in abroad aerospace industries are briefly summarized firstly. Then, the progress of tape laying technologies in China, such as machine design, CAD/CAM software, materials and technology, is addressed. By analyzing the key technologies and application, it is pointed out that the efficient tape laying with low cost will be the hot point in the future. Later, the progress in fundamental studies on fiber placement in different universities and institutes is summarized, and fiber placement application studies such as industry machine and processing in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics are introduced. Finally, the key problems of fiber placement are summarized and the corresponding study subjects are suggested.

Key words: advanced composites; commercial aircraft; tape laying; fiber placement

先进复合材料已经成为航空航天器主要结构材料,各类飞机的复合材料用量近年来迅速增加(图 1)。飞机复合材料主承力构件主要采用预浸料成形技术制造,而自动铺放成形是替代人工铺叠、提高质量和生产效率的关键,在制造大型复合材料构件时优势极为突出。以大型飞机为例,从 A380 到 B787, A350, 其复合材料用量大幅度增加,正是由于自动铺放技术的发展与应用起到了关

键作用(图 2)。

根据预浸料形态,自动铺放可分为自动铺带(Tape laying)与自动铺丝(Fiber placement)两类。自动铺带采用有隔离衬纸单向预浸带(25~300 mm),多轴机械臂(龙门或卧式)完成铺放位置定位,铺带头自动完成预浸带输送与剪裁、加热辊加压铺叠到模具上,整个过程采用数控技术自动完成(图 3(a))。自动铺丝采用多束(最多可达 32

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2014CB046501)资助项目;民机预研专项资助项目;江苏高校优势学科建设工程资助项目。

收稿日期:2015-08-20;**修订日期:**2015-09-30

通信作者:肖军,男,教授,博士生导师,E-mail:j. xiao@nuaa. edu. cn。

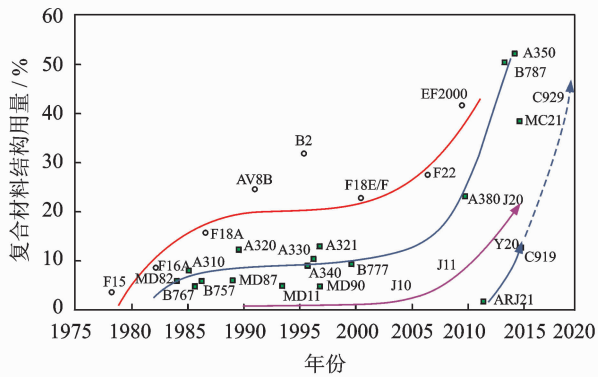


图 1 飞机复合材料用量

Fig. 1 Composites in aircrafts

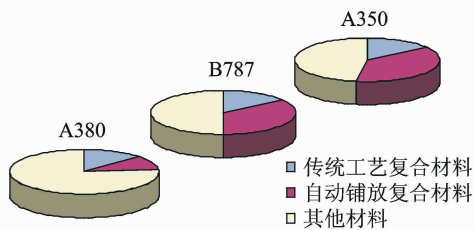


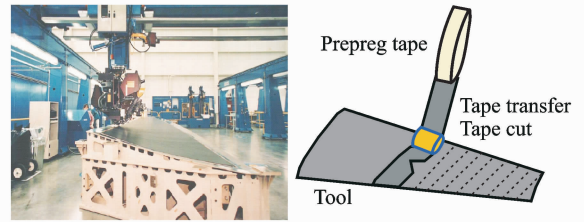
图 2 自动铺放在大型飞机中的应用

Fig. 2 Automated placement application in commercial airplane

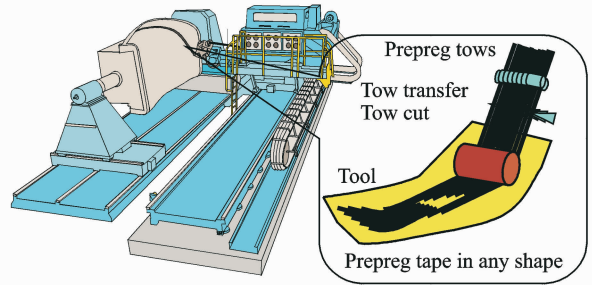
根)预浸纱/分切的预浸窄带(3~25 mm),分别独立输送、切断,由铺丝头将数根预浸纱集束成为一条宽度可变的预浸带(宽度通过控制预浸纱根数调整),再热压铺放到模具上定型(图 3(b))。自动铺带与自动铺丝的共同特点是自动化高速成形、质量可靠,尤其适用于大型复合材料构件制造;其中自动铺带主要用于小曲率或单曲率构件(如翼面、柱/锥面)的自动铺叠,由于预浸带较宽,以高效率见长;而自动铺丝侧重于实现复杂形状的双曲面(如机身、翼身融合体及 S 进气道等),适应范围宽,但效率逊于前者。自动铺放技术是数控机床技术、CAD/CAM 软件技术和材料工艺技术的高度集成。

自动铺放成形采用的材料体系成熟度高,设计成形方法继承性好,易于数字化设计和自动化制造,已经成为发达国家飞机复合材料大型构件的主要成形方法;新一代大型飞机 B787, A350 的翼面均采用自动铺带,而机身所有构件均采用自动铺丝。复合材料的大量应用推动了自动铺放技术的快速发展,各类新技术层出不穷^[1],大大提高了生产效率和适用性,同时也降低了制造成本。

中国国内自动铺放技术研究开展 10 余年,从装备、软件、材料工艺到应用,已经突破关键技术,实现了工程应用。本文通过介绍中国国内自动铺



(a) 自动铺带



(b) 自动铺丝

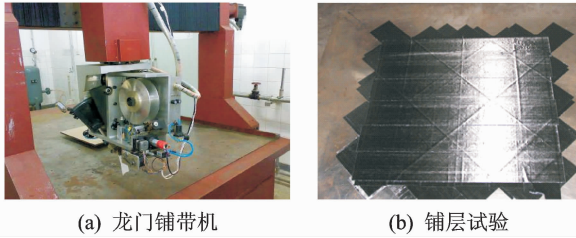
图 3 自动铺带与自动铺丝技术原理

Fig. 3 Schemes of tape laying and fiber placement

放技术研究进展,分析指出未来自动铺放技术发展中需要解决的关键问题。

1 中国自动铺带技术研究进展

中国国内自动铺带技术起步于“十五”初期,2003 年南京航空航天大学(以下简称“南航”)与上海万格复合材料技术有限责任公司合作承担北京航空材料研究院自动铺带原理样机的研制。肖军课题组设计了具有 3 轴平移、双摆角运动的 5 轴台式龙门机械臂,研制了力矩电机收放-步进电机驱动的预浸带输送、预浸带气动切割与超声辅助切割、主-辅压辊成形等技术^[2-4];应用开放式数控系统技术开发出 5 轴联动、3 轴随动切割和温度与压力控制的自动铺带控制系统软硬件,实现了预浸带定位、剪裁、热压及铺叠的基本功能;根据微分几何理论证明了在可展曲面上“自然路径”与测地线的等价性,应用弧长展开变换方法构造了柱面铺带轨迹算法^[5-6],进而开发了基于 AutoCAD 环境、具有机器代码生成和自动铺带仿真功能的自动编程软件^[7],实现了给定形状及铺层构件的铺带轨迹生成和后置处理与加工指令生成。2005 年肖军课题组研制成功国内第一台自动铺带原理样机(图 4),交付北京航空材料研究院用于环氧预浸料和双马来酰亚胺预浸料铺带适应性与铺带工艺试验^[8]。上述基础研究工作为发展具有自主知识产权的自动铺放技术奠定了基础。

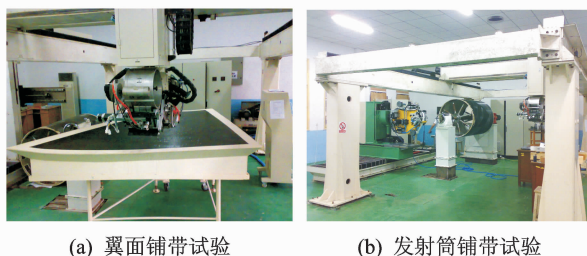


(a) 龙门铺带机 (b) 铺层试验

图 4 中国第 1 台自动铺带原理样机及应用

Fig. 4 The first prototype of tape laying machine in China and its application

南航在自动铺带原理样机及工艺研究基础上深入研究,设计了 5 轴龙门及其与主轴联动的综合运动试验平台(图 5),开展了自动铺带系列研究工作;完成了基于 UMAC 的多轴多任务开放式数控系统软硬件^[9-11];开发了带双模式精确进给与张力控制技术,研制了分体压靴与弹性压辊组合施压及根据模具特征的压力自适应调节控制技术^[12],实现了任意曲面自适应均匀加压及其精确控制;研制了 5 轴双超声切割系统^[13],实现了复杂产品外廓预浸带切割;研究铺放过程中加热温度、时间及压力对铺放质量的影响规律,研制了具有速度自适应加热系统,提高了铺带材料适应性^[14-15];研制的预浸带缺陷激光监测系统可以检测出 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的夹杂;研制的基于预浸带各向异性折光和数字图像方法的预浸带铺叠间隙测控技术^[16]识别精度达到 0.1 mm ,实现了自动铺带在线质量检测与测控;应用计算几何理论,提出的基于“自然路径”直接计算方法提高了铺带轨迹计算的精度和速度^[17-18],达到国外同类自动铺带软件水平;根据圆锥体的特殊性,在国际上首次提出锥形体自动铺带方法^[19-20]。2007 年,南航完成上述装备技术集成,研制成功国内第 1 台中型自动铺带工程样机综合试验系统(图 5),主要功能与国外自动铺带机水平相当;完成了典型翼面结构和筒形结构的自动铺带演示验证。该研究成果于 2008 年直接用于筒段铺带机研制和战略导弹发射筒自动铺带制造^[21]。



(a) 翼面铺带试验 (b) 发射筒铺带试验

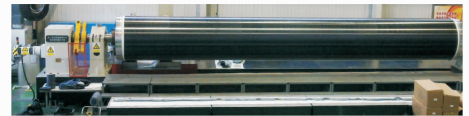
图 5 自动铺带工程样机试验系统与自动铺带试验

Fig. 5 Tape laying test system and tape laying test

2008 年以来,南航致力于产学研的相互结合,持续开发自动铺带技术^[22-27]:优化自动铺带机构型与控制,研究了具有复杂外形轮廓和边界构件的铺带轨迹规划高效算法;研究了自动铺带工艺窗口和粘结性控制及热塑性铺放等^[28-33];陆续研制了 $\Phi 2.5\text{ m} \times 12\text{ m}$, $\Phi 2.5\text{ m} \times 18\text{ m}$, $\Phi 2.5\text{ m} \times 21\text{ m}$, $\Phi 4.5\text{ m} \times 15\text{ m}$, $\Phi 5.3\text{ m} \times 16\text{ m}$ 多型筒段专用自动铺带机系统(图 6),用于各类装备研制与批量生产。同时南航与上海重型机床厂和上海飞机制造公司合作,于 2014 年研制了面向大型客机平尾的自动铺带机,完成了平尾蒙皮自动铺带验证(图 7),为将来大型飞机制造产业链发展提供了技术支撑。



(a) 大型筒段自动铺带机



(b) 铺放产品

图 6 大型筒段自动铺带机及铺放产品

Fig. 6 Cylinder tape laying machine and its products



图 7 大型客机平尾自动铺带试验

Fig. 7 Tape laying test for horizontal tail of commercial aircraft

北京航空制造工程研究所为加快自动铺带技术在航空工业的应用进程,于 2009 年引进法国 FOREST-LINE 两步法铺带系统,消化吸收再创新后开发出大型自动铺带机系统和具有自主知识产权的铺带数控编程系统^[34-36](图 8),并形成成套自动铺带制造技术,目前已经用于多种飞机构件研制与批量产生。



图 8 大型龙门铺带机系统

Fig. 8 Gantry tape laying machine

2008 年以来,中国国内陆续引进西班牙 M-TORRIS 和美国 MAG 等 6 套自动铺带机系统,各主机厂所结合型号与预研需求开展产学研:哈尔滨飞机制造公司与华中科技大学研究了预浸料适应性、并对工艺参数进行优化^[37-41];成都飞机制造公司研究了铺带监控软件^[42];还有学者开展了工艺质量和工时优化等研究^[43-45]。同时中国国内相关院所开发了 603A,5228A,9916II 等系列国产铺带预浸料,开展了导弹发射筒、飞机翼面壁板和长桁热成形等工艺攻关,形成自动铺带工艺规范和成套应用技术,已经用于东风导弹、第四代战斗机、大客以及大运等。

经过 10 余年的研发,中国国内自动铺带技术已经成熟,并应用于航空航天各个领域。下一步研究方向为开发新的高效低成本制造技术,以扩大其应用领域、增加适用材料、提高效率并降低成本。

2 中国自动铺丝技术研究进展

中国国内对于自动铺丝技术的研究早于自动铺带技术,但由于自动铺丝的技术难度和复杂程度(铺丝装备长期禁运,设计及软件和材料工艺复杂、要求高)远大于自动铺带技术,而且前期需求不如自动铺带急迫,中国自动铺丝技术研究工作在相当长的一段时间里集中在自动铺丝装备方案构型与数控系统技术、轨迹规划与仿真、预浸纱制备和铺丝工艺等基础研究层面,2010 年以后逐渐向应用技术方向研究,近几年发展迅速。

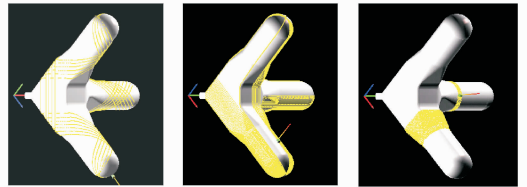
南航于 2000 年开始 8 丝束自动铺丝原理样机试制(图 9)及相关研究:肖军课题组以构架式卫星复合材料三角接头为研究对象,开展了构件数值建模和铺丝路径规划研究,同时应用机器人 D-H 方法建立了典型 3P-3R 机器人运动学反问题控制方程并实施了成形仿真(图 10)^[46-47];针对一般自动铺丝轨迹规划问题,提出了 3 种铺丝路径轨迹规划方案,建立了丝束覆盖性分析与断纱准则,研究了

丝束状态量与切断-重启动作量的映射关系,初步形成了自动铺丝设计制造的基础框架,同时在 CATIA 环境下开展了相关 CAD/CAM 软件原型编写,以 S 进气道和回转体自动铺丝问题为例完成了系统分析与仿真^[48-50],并开展了相应试验(图 11)。周来水课题组开展了系列自动铺丝路径规划方法研究,旨在提高铺丝路径规划效率和计算精度^[51-57]。

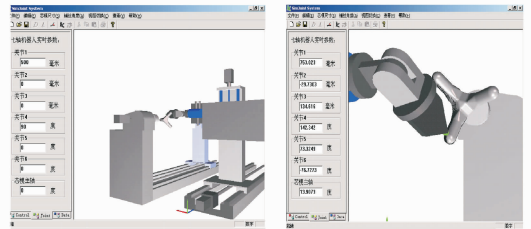


图 9 中国第 1 台自动铺丝原理样机

Fig. 9 The first prototype of fiber placement machine in China



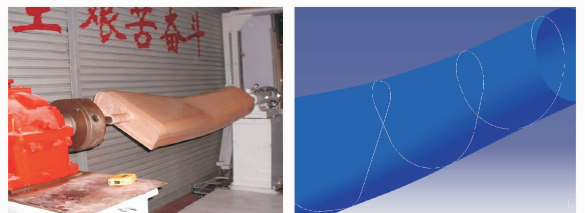
(a) 轨迹规划



(b) 成形仿真

图 10 三角接头铺丝轨迹规划与成形仿真

Fig. 10 Fiber placement path programming and simulation for triangle conjunction



(a) S 进气道铺丝模具

(b) 铺丝轨迹规划及仿真

图 11 S 进气道铺丝轨迹规划与成形仿真

Fig. 11 Fiber placement path programming and simulation for S inlet duct

武汉理工大学田会方课题组于 2006 年完成了 4 丝束铺丝原理样机的试制(图 12),开展了自动铺丝装备构型分析、控制系统及铺丝间隙检测、铺丝路径规划与仿真等基础研究^[58-65]。



图 12 武汉理工大学 4 丝束自动铺丝原理样机
Fig. 12 Prototype of fiber placement machine with four tows designed by Wuhan University of Technology

哈尔滨工业大学富宏亚课题组 2007 年在 6 轴缠绕机平台上完成 4 丝束铺丝原理样机研制(图 13),开展了铺丝曲面重构与路径规划方法及其分析比较、铺丝仿真、张力控制方法与工艺缺陷分析等系列基础研究^[66-72]。



图 13 哈尔滨工业大学 4 丝束自动铺丝原理样机
Fig. 13 Prototype of fiber placement machine with four tows designed of Harbin Institute of Technology

西安交通大学段玉岗课题组 2008 年以六轴机器人为平台开展自动铺丝技术研究,先后搭建了 8 丝束和 16 丝束铺丝机器人(图 14),开展了铺丝头、铺丝工艺影响因素及铺丝质量检测技术研究^[74-78],在原位电子束/光固化/超声固结铺丝方面深入探索,为低成本铺丝技术开辟了新的方向^[79-82]。

随着铺带技术的成功应用和新型航空航天器的研发,国内对铺丝技术需求日趋旺盛。南航结合大型飞机、无人机、第四代战斗机和战略导弹等航空航天应用的迫切需求,立足于成熟的铺带技术和



图 14 16 丝束铺丝机器人
Fig. 14 Fiber placement robot with 16 tows

前期铺丝技术基础研究,着重研究自动铺丝应用技术。南航于 2010 年完成了两型高柔性 8 丝束铺丝机研制(图 15),重点研究纱路传输和预浸纱切割,以进一步优化铺丝路径规划算法^[83-85]。同时,为突破中国铺丝材料匮乏瓶颈,南航率先研制铺丝专用预浸纱分切-卷绕系统及热熔直浸预浸纱制备技术^[86-87](图 16),突破了预浸纱含胶量宽度精确控制等瓶颈;与应用单位合作共同完成了飞机翼梁、翼身融合体、S 进气道和飞机尾锥壁板等多种构件自动铺丝研制(图 17),实现了自动铺丝工程应用

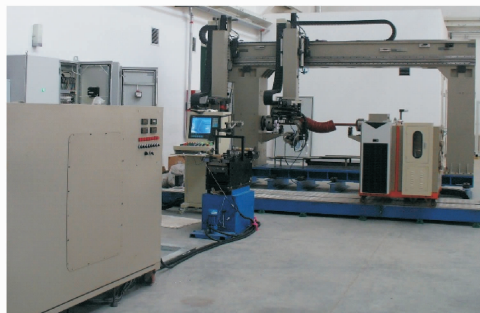


图 15 8 丝束自动铺丝机
Fig. 15 Fiber placement machine with eight tows



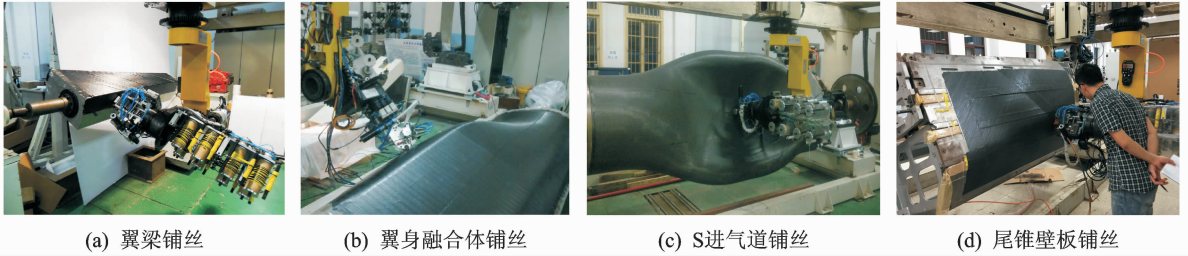
图 16 预浸纱分切-卷绕机
Fig. 16 Split prepreg cut-winding machine

的突破,其中S进气道技术已经用于某型号飞机。

2013年以来,南航已研制16丝束、24丝束大型铺丝机和8丝束铺丝机器人多台,与应用单位紧密合作开展产学研,完成了火箭舱段、卫星承力筒及尾锥试验件等自动铺丝研制,实现了自动铺丝技

术的工程化应用(图18)。

北京航空制造工程研究所面向宽体客机机身,引进法国FOREST-LINE公司的32丝束铺丝头,集成开发大型铺丝系统^[88-89]和数控编程系统^[90-91],于2015年投入使用(图19)。



(a) 翼梁铺丝

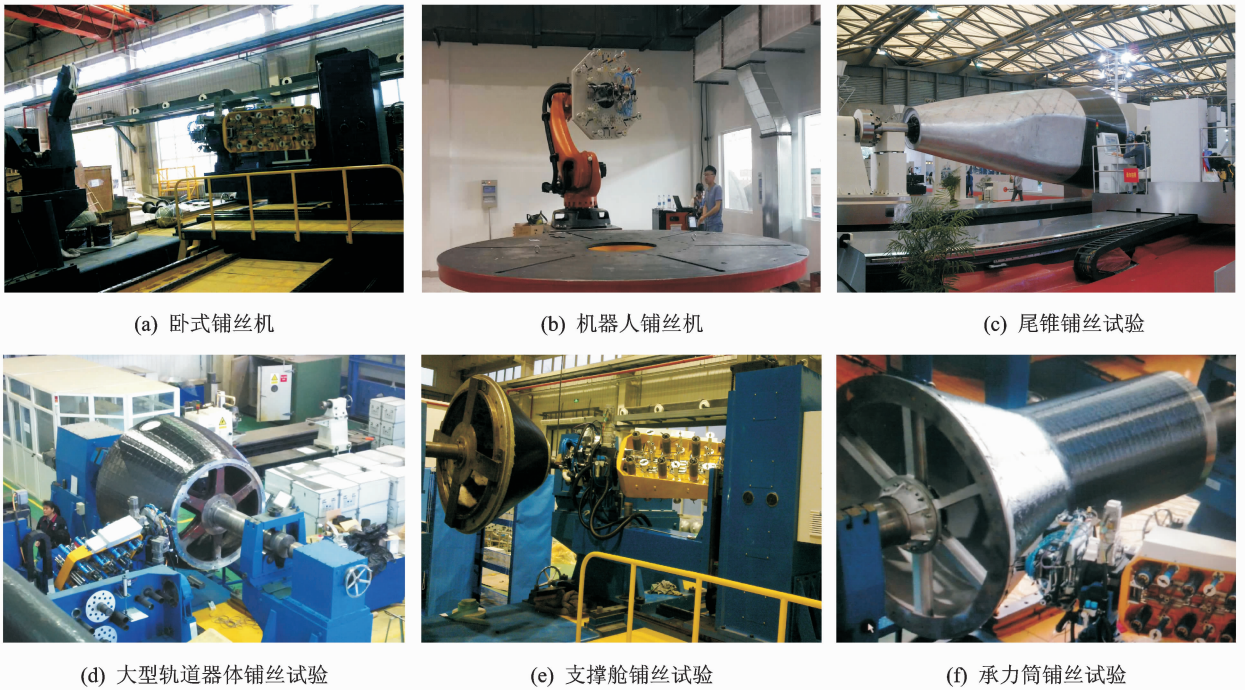
(b) 翼身融合体铺丝

(c) S进气道铺丝

(d) 尾锥壁板铺丝

图17 翼梁、翼身融合体、S进气道和尾锥壁板自动铺丝

Fig. 17 Fiber placement of wing beam, wing body fusion, S inlet and end cone wall panels



(a) 卧式铺丝机

(b) 机器人铺丝机

(c) 尾锥铺丝试验

(d) 大型轨道器体铺丝试验

(e) 支撑舱铺丝试验

(f) 承力筒铺丝试验

图18 大型铺丝机及工程应用

Fig. 18 Fiber placement machine and engineering application

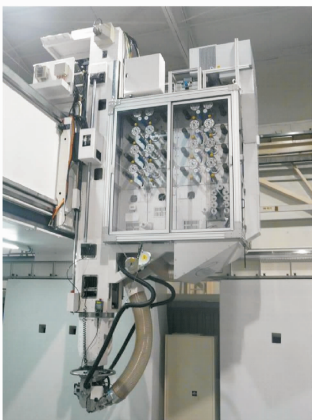


图19 大型龙门铺丝机系统

Fig. 19 Gantry fiber placement machine

经过10多年研究,自动铺丝已经突破关键技术,自主研发的铺丝机系统已经满足使用要求,但国产设备的可靠性、动力特性还需要研究和提高^[92-93]。虽然机器人型铺丝机进口解禁,但大型铺丝机仍然禁运,自动铺丝技术应用的关键——材料工艺技术仍亟待深入研究^[94-95],只有形成技术规范和成套技术,才能实现自动铺丝工业化制造。

3 自动铺放技术发展趋势

先进复合材料在航空航天器的大量应用直接推动了自动铺放技术的发展,国外自动铺放技术虽已成熟,但仍在不断发展和进步,并通过开发新技

术来实现复合材料构件低成本高效益制造。国外自动铺放技术主要有以下5个发展趋势:

(1)铺放装备专门化:为降低整个制造成本,面向产品的专用铺放装备发展迅速,不仅降低装备成本,而且提高装备使用效率;尤其是采用机器人作为平台的铺放装备,可以使装备成本大幅度下降。

(2)铺带-铺丝界限模糊化:多带铺带和宽纱铺丝使得自动铺丝与自动铺带技术差别减小。

(3)热塑性自动铺放技术日趋成熟:应用热塑性复合材料韧性好、环境优化和可以实现在线固结成形等优点,大功率激光加热的热塑性铺放技术发展迅速。

(4)多种成形技术复合化:自动铺放与其他技术,如超声切割、热成形等结合,实现复杂构件低成本制造。

(5)“干铺丝”技术崭露头角:采用部分浸渍热塑性树脂($\leq 8\%$)的预浸纱,铺丝形成预制件后再液体成形制造大型构件。“干铺丝”技术综合了预浸料成形和液体成形两种方法的优点,已经在俄罗斯的MC-21机翼得到应用,显示出极强的生命力。

中国国内自动铺放技术起步10多年,已有了长足进步,技术成熟度在不断提高。然而航空航天工业及其他工业对自动铺放技术的需求日益迫切,亟待开展的研究方向包括:

(1)高效铺带技术:包括两步法铺带技术、多带铺放技术等。

(2)低成本铺放技术:包括铺带机器人技术、铺丝机器人技术、长桁专机铺放技术等。

(3)自动铺丝装备可靠性技术:自动铺丝系统复杂,可靠性是保障效率和质量的根本。

(4)“干铺丝”技术:包括特种干丝预浸纱、高效加热技术等。

(5)热塑性铺放技术:包括铺放装备技术、热压与快速冷却控制、变形控制等。

(6)自动铺丝工艺技术:包括模具工装技术、质量控制技术等。

(7)面向自动铺放的复合材料设计技术:自动铺丝不同于手工铺叠和自动铺带,预浸纱裁断点和变刚度后的就位强度及设计准则均需要深入研究,以充分发挥自动铺丝工艺的优势。

致谢

感谢国内同行在本文撰写过程中给予的大力支持,特别感谢西安交通大学卢秉恒院士和段玉岗教授、哈尔滨工业大学富宏亚教授、武汉理工大学田会方教授、华中科技大学孙容磊教授、北京航空制造工程研究所张媛研究员等提

供的资料和照片。

参考文献:

- [1] Bruce M. Automating composites fabrication to meet increased throughput required by industries ranging from aerospace to wind energy, automation speeds composite production[J]. *Manufacturing Engineering*, 2008, 140(4): CT1-CT6.
- [2] 刘林,文立伟,陈瑞斌,等. 复合材料自动铺带机专用数控系统[J]. *南京航空航天大学学报*, 2007, 39(4): 486-490.
Liu Lin, Wen Liwei, Chen Ruibin, et al. Numerical control system for automated tape laying machine[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2007, 39(4): 486-490.
- [3] 刘林,文立伟,李勇,等. 基于 PMAC 随动控制模式下自动铺带切割的研究[J]. *宇航材料工艺*, 2007, 37(5): 46-49.
Liu Lin, Wen Liwei, Li Yong, et al. Research on tape-cutting for automated tape laying based on tracking control mode of PMAC[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2007, 37(5): 46-49.
- [4] Liu L, Wen L W, Li Y, et al. PMAC-based tracking control system for 8-axis automated tape-laying machine[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2009, 22(5): 558-563.
- [5] 胡翠玲,肖军,李勇,等. 复合材料自动铺带技术研究(I)——“自然路径”特性分析及算法[J]. *宇航材料工艺*, 2007, 37(1): 40-43.
Hu Cuiling, Xiao Jun, Li Yong, et al. Study on automated tape-laying technique for composites Part I: Natural Path property analysis and calculation method[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2007, 37(1): 40-43.
- [6] 臧建峰,肖军,李勇,等. 复合材料自动铺带技术研究(II)——柱面上沿“自然路径”铺带的压辊坐标生成[J]. *宇航材料工艺*, 2007, 37(1): 44-46.
Zang Jianfeng, Xiao Jun, Li Yong, et al. Study on automated tape-laying technique for composites Part II: Roll's coordinate generation for tape-laying on cylinder along Natural Path[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2007, 37(1): 44-46.
- [7] 还大军,李勇,吴海桥,等. 复合材料自动铺带技术研究(III)——平面铺带 CAD/CAM 软件开发[J]. *宇航材料工艺*, 2007, 37(1): 47-50.
Huan Dajun, Li Yong, Wu Haiqiao, et al. Study on automated tape-laying technique for composites Part III: Flat tape-laying CAD/CAM software development[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2007,

- 37(1): 47-50.
- [8] 蒋诗才, 邢丽英, 陈祥宝. 复合材料预浸料自动铺带成型适宜性研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(21): 44-47.
Jiang Shicai, Xing Liying, Chen Xiangbao. Research on molding suitability of prepreg composites for automated tape performance[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(21): 44-47.
- [9] 文立伟, 张建宝, 李勇, 等. 基于主从控制模式的铺带机控制技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(1): 110-114.
Wen Liwei, Zhang Jianbao, Li Yong, et al. Automatic tape-laying control based on master-slave mode [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2008, 40(1): 110-114.
- [10] 张建宝, 文立伟, 肖军, 等. 自动铺带机预浸带精密输送控制技术[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1716-1721.
Zhang Jianbao, Wen Liwei, Xiao Jun, et al. Control technique for prepreg tape precision feeding in automatic tape-laying[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(6): 1716-1721.
- [11] 张建宝, 文立伟, 肖军, 等. 自动铺带机送带控制技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 41(6): 772-776.
Zhang Jianbao, Wen Liwei, Xiao Jun, et al. Tape feeding control technique for automatic tape-laying machine[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 41(6): 772-776.
- [12] 张建宝, 文立伟, 肖军, 等. 自动铺带成型压力控制技术[J]. 航空学报, 2009, 30(10): 1973-1977.
Zhang Jianbao, Wen Liwei, Xiao Jun, et al. Processing pressure control technique for automatic tape laying [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(10): 1973-1977.
- [13] 文立伟, 严飙, 肖军, 等. 复合材料超声切割系统及稳定性研究[J]. 航空制造技术, 2010(17): 49-52.
Wen Liwei, Yan Biao, Xiao Jun, et al. Research on ultrasonic cutter system and stability of composites [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(17): 49-52.
- [14] 余永波, 文立伟, 肖军, 等. 自动铺带中红外加热技术研究[J]. 航空学报, 2011, 32(6): 1124-1131.
Yu Yongbo, Wen Liwei, Xiao Jun, et al. Study of infrared heating technology in automated tape-laying [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(6): 1124-1131.
- [15] 文立伟, 余永波, 齐俊伟, 等. 基于自动铺放成型的红外加热系统研究[J]. 航空学报, 2011, 32(10): 1937-1944.
Wen Liwei, Yu Yongbo, Qi Junwei, et al. Study on infrared heating system based on automatic tape laying [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(10): 1937-1944.
- [16] 陈文, 曹力, 肖军, 等. 基于视觉的复合材料自动铺放表面纹理实时检测方法[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(18): 4143-4149.
Chen Wen, Cao Li, Xiao Jun, et al. A vision-based real-time detection method of texture in automatic composite fiber placement[J]. Science Technology & Engineering, 2011, 11(18): 4143-4149.
- [17] 渠涛, 肖军, 李勇, 等. 基于 OpenGL 的圆筒段自动铺带仿真研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2008, 29(3): 3-6.
Qu Tao, Xiao Jun, Li Yong, et al. Dynamic simulation of the automatic tape-laying in cylinder production based on OpenGL [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2008, 29(3): 3-6.
- [18] 左龙彦, 肖军, 李勇, 等. MFC 环境下基于 OpenGL 的开孔圆筒的自动铺带建模与仿真[J]. 玻璃钢/复合材料, 2008, 29(3): 24-26.
Zuo Longyan, Xiao Jun, Li Yong, et al. 3D model and simulation of tape laying on cylinder with opening based on MFC and OpenGL [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2008, 29(3): 24-26.
- [19] 张振甫, 肖军, 吴海桥, 等. 复合材料锥壳 0° 铺层的自动铺放成型方法研究[J]. 宇航材料工艺, 2007, 37(2): 55-57.
Zhang Zhenfu, Xiao Jun, Wu Haiqiao, et al. Study on laminating method for 0° plies in composite conical shell manufactured by automated tape laying [J]. Aerospace Materials & Technology, 2007, 37(2): 55-57.
- [20] 李勇, 肖军, 还大军, 等. 复合材料锥壳螺旋向铺层自动铺带成型方法[J]. 宇航材料工艺, 2008, 38(5): 8-11.
Li Yong, Xiao Jun, Huan Dajun, et al. Laminating method of manufacturing spiral-path plies in composite conical shell by automated tape laying [J]. Aerospace Materials & Technology, 2008, 38(5): 8-11.
- [21] 文立伟, 张建宝, 肖军, 等. 大型筒段构件自动铺带成型技术[J]. 航空学报, 2009, 30(12): 2456-2461.
Wen Liwei, Zhang Jianbao, Xiao Jun, et al. ATL technology for large cylinder production [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(12): 2456-2461.
- [22] 罗海燕, 李勇, 肖军, 等. 复合材料自动铺带技术研究——曲面铺带轨迹算法[J]. 航空学报, 2009, 30

- (9): 1782-1787.
- Luo Haiyan, Li Yong, Xiao Jun, et al. Research on automatic tape-laying technique for composites—calculation method of tape-laying path on free-form surfaces[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(9): 1782-1787.
- [23] 叶进, 文立伟, 李勇, 等. 复合材料自动铺带技术——曲面铺带 CAM 技术[J]. *宇航材料工艺*, 2009, 39(4): 10-13.
- Ye Jin, Wen Liwei, Li Yong, et al. Automated tape-laying technology for composites—curved surface tape-laying CAM technology[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2009, 39(4):10-13.
- [24] 还大军, 肖军, 李勇. 基于弧长的复合材料自动铺带统一边界处理方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2010, 42(5): 645-649.
- Huan Dajun, Xiao Jun, Li Yong. Uniform boundary treatment in automated tape-laying based on arc-length[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2010, 42(5): 645-649.
- [25] 还大军, 肖军, 李勇. 复合材料自动铺放 CAD/CAM 软件技术[J]. *航空制造技术*, 2010(17): 42-45.
- Huan Dajun, Xiao Jun, Li Yong. CAD/CAM software technology for composites automated placement [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2010 (17): 42-45.
- [26] 赵增林, 王显峰, 文立伟, 等. 双曲面自动铺带机床的构型改进[J]. *航空学报*, 2011, 32(6):1132-1138.
- Zhao Zenglin, Wang Xianfeng, Wen Liwei. Configuration improvement of ATL mechanism applied to hyperbolic surface[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(6):1132-1138.
- [27] 严飙, 文立伟, 肖军, 等. 复合材料自动铺放机主轴双驱同步控制研究[J]. *航空制造技术*, 2012(18): 53-56.
- Yan Biao, Wen Liwei, Xiao Jun, et al. Study on synchronizing control of double drive for spindle of composites automated placement machine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2012(18): 53-56.
- [28] 李俊斐, 王显峰, 肖军, 等. 面向柱面结构的自动铺带四轴联动成形研究[J]. *航空学报*, 2013, 34(5): 1232-1240.
- Li Junfei, Wang Xianfeng, Xiao Jun, et al. Research on four-axis simultaneous motion controlled automated tape laying for cylindrical structures [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34 (5): 1232-1240.
- [29] 文琼华, 王显峰, 何思敏, 等. 温度对预浸料铺放效果的影响[J]. *航空学报*, 2011, 32(9): 1740-1745.
- Wen Qionghua, Wang Xianfeng, He Simin, et al. Influence of temperature on placement effect of prepreg[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(9): 1740-1745.
- [30] 黄志军, 王显峰, 戴振东, 等. 自动铺放过程双马树脂预浸料温度与黏度[J]. *复合材料学报*, 2012, 29(3): 49-53.
- Huang Zhijun, Wang Xianfeng, Dai Zhendong, et al. Temperature and viscosity of bismaleimide resin prepregs in automated tape laying process[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2012, 29(3): 49-53.
- [31] 陆楠楠, 肖军, 齐俊伟, 等. 面向自动铺放的预浸料动态黏性实验研究[J]. *航空学报*, 2014, 35(1): 279-286.
- Lu Nannan, Xiao Jun, Qi Junwei, et al. Experimental research on prepreg dynamic tack based on automated placement process [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(1): 279-286.
- [32] 王敏, 李勇, 肖军, 等. NY9200GA 树脂体系预浸料自动铺放粘结性工艺研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2015, 47(4): 471-478.
- Wang Min, Li Yong, Xiao Jun, et al. Research on the prepreg tack of NY9200GA resin series for automated placement process[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2015, 47(4): 471-478.
- [33] 宋清华, 文立伟, 严飙, 等. 热塑性树脂基复合材料自动铺带技术[J]. *航空制造技术*, 2011(15): 42-44.
- Song Qinghua, Wen Liwei, Yan Biao, et al. Automated tape laying technology of thermoplastic and resin-based composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2011(15): 42-44.
- [34] 孟月梅. 复合材料构件自动铺带支撑软件实现方法的探讨[J]. *航空制造技术*, 2009(24): 104-107.
- Meng Yuemei. Research on automated tape-laying support software for composites components [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2009(24): 104-107.
- [35] 梁岱春, 向颖. 复合材料构件自动铺带数控编程系统研究[J]. *航空制造技术*, 2013(15): 47-50.
- Liang Daichun, Xiang Ying. Research on automated tape-laying NC programming system for composites component[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013(15): 47-50.
- [36] 孟月梅, 王伟. 复合材料自动铺带的预浸带规划技术[J]. *航空制造技术*, 2013(21): 81-84.
- Meng Yuemei, Wang Wei. Prepreg tape designing technology on automatic tape-laying for composites [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013

- (21): 81-84.
- [37] 徐福泉, 高大伟, 杨楠楠. 复合材料自动铺带技术应用及方案示例[J]. 航空制造技术, 2009(22): 50-54.
Xu Fuquan, Gao Dawei, Yang Nannan. Application and proposal sample of composite automatic tape-laying technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(22): 50-54.
- [38] 黄文宗, 孙容磊, 连海涛, 等. 预浸料的铺放适宜性评价(一)—粘性篇[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(6): 3-11.
Huang Wenzong, Sun Ronglei, Lian Haitao, et al. Assessment for placement suitability of prepreg-part of tack[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2013(6): 3-11.
- [39] 黄文宗, 孙容磊, 张鹏, 等. 预浸料的铺放适宜性评价(二)—铺覆性篇[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(8): 3-8.
Huang Wenzong, Sun Ronglei, Zhang Peng, et al. Assessment for placement suitability of prepreg-part of tack[J]. Fiber Reinforced Plastics/composites, 2013(8): 3-8.
- [40] 黄文宗, 孙容磊, 张鹏, 等. 基于响应曲面法的自动铺放工艺参数分析与优化[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(4): 37-44.
Huang Wenzong, Sun Ronglei, Zhang Peng, et al. Processing parameters analysis and optimization for automated tape laying using response surface methodology[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2013(4): 37-44.
- [41] 张鹏, 孙容磊, 连海涛, 等. 自动铺带铺层贴合形成机制[J]. 复合材料学报, 2014, 31(1): 40-48.
Zhang Peng, Sun Ronglei, Lian Haitao, et al. Bonding mechanism of ply during automated tape laying process[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(1): 40-48.
- [42] 聂海平, 胡业勤, 黄当明. 复合材料自动铺带机监控程序开发[J]. 制造技术与机床, 2014(11): 25-27.
Nie Haiping, Hu Yeqin, Huang Dangming. The monitor program development of composite automatic tape-laying machine[J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2014(11): 25-27.
- [43] 卫江. 基于温度对预浸料铺放质量的影响研究[J]. 机械工程师, 2014(7): 24-25.
Wei Jiang. Research on influence of temperature on placement effect of prepreg[J]. Mechanical Engineer, 2014(7): 24-25.
- [44] 卫江. 压力对预浸料铺放质量的影响研究[J]. 机械工程与自动化, 2014(5): 210-211.
Wei Jiang. Influence of pressure on placement quality of prepreg[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2014(5): 210-211.
- [45] 钟小丹, 陈普会. 复合材料自动铺带工艺工时估算及软件开发[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(1): 38-42.
Zhong Xiaodan, Chen Puhui. Process time estimation model for composite automated tape laying and its code development[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(1): 38-42.
- [46] 钱钧, 肖军, 赵东标, 等. 复合材料构架式卫星接头自动铺丝成型仿真研究[J]. 宇航学报, 2004, 25(6): 694-694.
Qian Jun, Xiao Jun, Zhao Dongbiao, et al. Processing simulation for the composites conjunction in frame satellite by automated fiber placement[J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(6): 694-694.
- [47] 钱钧, 肖军. 构架式卫星接头自动铺丝的建模研究[J]. 纤维复合材料, 2002, 19(2): 3-5.
Qian Jun, Xiao Jun. Research on the modeling of the satellite triangle conjunction of frame in automated fiber placement[J]. Fiber Composites, 2002, 19(2): 3-5.
- [48] 许斌, 安鲁陵, 肖军, 等. 自动铺丝机运动控制信息的生成与仿真[J]. 制造业自动化, 2005, 27(1): 1-4.
Xu Bin, An Luling, Xiao Jun, et al. Generation of control information to movement of machine tool and simulation in composite fiber placement[J]. Manufacturing Automation, 2005, 27(1): 1-4.
- [49] 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学报, 2008, 20(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, 20(2): 228-233.
- [50] 曾伟, 肖军, 李勇, 等. 回转体自动铺丝轨迹规划与覆盖性分析[J]. 宇航学报, 2010, 31(1): 239-243.
Zeng Wei, Xiao Jun, Li Yong, et al. Research on path planning and cover ability analysis of automatic fiber placement for structures in revolving shell[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(1): 239-243.
- [51] 周焱, 安鲁陵, 周来水. 复合材料自动铺丝路径生成技术研究[J]. 航空精密制造技术, 2006, 42(2): 39-41.
Zhou Yan, An Luling, Zhou Laishui. Research on composite fiber placement path generation algorithm[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2006, 42(2): 39-41.

- [52] 李善缘, 王小平, 朱丽君. 复合材料铺丝成型中的路径规划[J]. 宇航材料工艺, 2009, 39(2): 25-29.
Li Shanyuan, Wang Xiaoping, Wang Lijun. Path planning for composite fiber placement [J]. Aerospace Materials & Technology, 2009, 39(2): 25-29.
- [53] 卢敏, 周来水, 王小平, 等. 锥形复合材料构件的铺丝路径规划与丝数求解[J]. 宇航材料工艺, 2009, 39(6): 15-18.
Lu Min, Zhou Laishui, Wang Xiaoping, et al. Fiber placement path planning and number determination for conic-shaped composite structures[J]. Aerospace Materials & Technology, 2009, 39(6): 15-18.
- [54] 李燕元, 王小平, 王志国, 等. 管道曲面构件自动铺丝路径规划[J]. 宇航材料工艺, 2010(5): 27-32.
Li Yanyuan, Wang Xiaoping, Wang Zhiguo, et al. Fiber placement path planning for canal surface component [J]. Aerospace Materials & Technology, 2010(5): 27-32.
- [55] 卢敏, 周来水, 安鲁陵, 等. 开曲面构件的多层铺丝路径生成算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(6): 735-738.
Lu Min, Zhou Laishui, An Luling, et al. Multi-layer path generation for open-contoured structures in robotic fiber placement[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(6): 735-738.
- [56] 卢敏, 周来水, 王小平. 一种基于投影法的铺丝路径优化生成算法[J]. 中国机械工程, 2011, 22(16): 1993-1996.
Lu Min, Zhou Laishui, Wang Xiaoping. Optimization of fiber steering in composite laminates using a curve projection algorithm[J]. 2011, 22(16): 1993-1996.
- [57] 卢敏, 周来水, 王小平, 等. 圆筒状构件的多层铺丝路径生成算法[J]. 航空学报, 2011, 32(1): 181-186.
Lu Min, Zhou Laishui, Wang Xiaoping. Trajectory generation for cylindrical structures in robotic multi-fiber placement[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(1): 181-186.
- [58] 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 Huijun, Huang Yahui. Mechanism design and simulation of fiber placement machine[J]. Mechanical Engineer, 2005(8): 92-94.
- [59] 王志辉, 曹德华. 纤维铺放系统的机构分析[J]. 中国水运: 学术版, 2006(2): 82-83.
Wang Zhihui, Cao Dehua. The analysis of fiber placement system[J]. China Water Transport: Academic Version, 2006(2): 82-83.
- [60] 王志辉, 吕佳. 纤维铺放头机构的研究[J]. 机械工程师, 2007(12): 93-94.
Wang Zhihui, Lu Jia. The research on mechanism of type laying head [J]. Mechanical Engineer, 2007(12): 93-94.
- [61] 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 Huijun, Wu Meng. Research and design of control system for fibre tape placement[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2008(2): 135-137.
- [62] 徐东亮, 李东海. 基于 OpenGL 的虚拟铺放机建模及参数化驱动[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2010, 32(3): 403-405.
Xu Dongliang, Li Donghai. Virtual layer placement machine's modeling and parametric driving by OpenGL[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering, 2010, 32(3): 403-405.
- [63] 田会方, 季晓丽. 基于计算机视觉的纤维带铺放间隙检测研究[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2010, 32(1): 15-17.
Tian Huijun, Ji Xiaoli. Image detection system of fiber tape laying based on machine vision[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering, 2010, 32(1): 15-17.
- [64] 周旭东, 徐东亮. 纤维铺放虚拟数控系统设计[J]. 现代机械, 2014(6): 1-3.
Zhou Xudong, Xu Dongliang. The design of virtual CNC system on fiber placement[J]. Modern Machinery, 2014(6): 1-3.
- [65] 胡斌, 徐东亮. 基于遍历法的开放曲面铺丝轨迹规划[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(6): 20-24.
Hu Bin, Xu Dongliang. Fiber Placement path planning for open surfaces based on traversal method[J]. Fiber Reinforced Plastics, 2014(6): 20-24.
- [66] 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 Zhenyu, Shao Zhongxi, Lu Hua, et al. Development of 7-dof four tows fiber placement machine and CNC system[J]. Journal of Materials Engineering, 2009(S2): 211-215.
- [67] 邵忠喜, 韩振宇, 李玥华, 等. 纤维铺放设备中丝束增减控制方法及其比较[J]. 航空学报, 2011, 32(1): 164-171.
Shao Zhongxi, Han Zhenyu, Li Yuehua, et al. Comparative study of tows increase or decrease methods for fiber placement machine[J]. Acta Aeronautica et

- Astronautica Sinica, 2011, 32(1):164-171.
- [68] 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.
- [69] 富宏亚, 邵忠喜, 韩振宇. 纤维铺放轨迹规划的两种方法及其比较研究[J]. 材料工程, 2009(S2): 349-353.
Fu Hongya, Shao Zhongxi, Han Zhenyu. Comparative study on two methods of fiber placement path planning[J]. Journal of Materials Engineering, 2009(S2): 349-353.
- [70] 邵忠喜, 富宏亚, 韩振宇, 等. S形进气道纤维铺放轨迹规划和优化方法[J]. 宇航学报, 2010, 31(3): 855-861.
Shao Zhongxi, Fu Hongya, Han Zhenyu, et al. Path planning and optimization algorithm for fiber placement of S-shaped inlet[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(3): 855-861.
- [71] 韩振宇, 李玥华, 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-angles trajectory planning algorithm of automated fiber placement for conical shell[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(3):400-405.
- [72] 李玥华, 富宏亚, 韩振宇, 等. 两类非可展曲面零件自动纤维铺放变角度轨迹规划算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(10): 1523-1529.
Li Yuehua, Fu Hongya, Han Zhenyu, et al. Variable-angle trajectory planning algorithm for automated fiber placement of two non-developable surfaces[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2013, 25(10):1523-1529.
- [73] 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.
- [74] 段玉岗, 董肖伟, 葛衍明, 等. 基于 CATIA 生成数控加工路径的机器人纤维铺放轨迹规划[J]. 航空学报, 2014, 35(9): 2632-2640.
Duan Yugang, Dong Xiaowei, Ge Yanming, et al. Robotic fiber placement trajectory planning based on CATIA CNC machining path[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(9): 2632-2640.
- [75] 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.
- [76] 段玉岗, 闫晓丰, 李超, 等. 压辊材料及形状对纤维铺放压紧效果的影响[J]. 航空学报, 2014, 35(4): 1173-1180.
Duan Yugang, Yan Xiaofeng, Li Chao, et al. Effect of material and shape of compaction roller on the voids and compaction uniformity in fiber placement process[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(4): 1173-1180.
- [77] 陶祎春, 贾书海, 段玉岗, 等. 碳纤维复合材料丝束带剪断状态快速检测方法[EB/OL]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150913.1827.008.html>, 2015.
Tao Weichun, Jia Shuhai, Duan Yugang, et al. Rapid cut state detection for carbon fiber composite tow [EB/OL]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150913.1827.008.html>, 2015.
- [78] 李金键, 段玉岗, 高侃, 等. 光纤智能复合材料纤维自动铺放制造工艺研究[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(9): 20-23.
Li Jinjian, Duan Yugang, Gao Kan, et al. Study of optical fiber smart composites fabricated by automatic fiber placement[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(9): 20-23.
- [79] 张小辉, 段玉岗, 李涤尘, 等. 原位光固化复合材料纤维铺放制造工艺[J]. 航空制造技术, 2011(15): 45-48.
Zhang Xiaohui, Duan Yugang, Li Dichen, et al. Fiber placement technology of UV In-situ curing composite[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(15): 45-48.
- [80] 赵新明, 段玉岗, 刘潇龙, 等. 低能电子束原位固化树脂基复合材料纤维铺放制造及性能[J]. 机械工程学报, 2013, 49(11): 121-127.
Zhao Xinming, Duan Yugang, Liu Xiaolong, et al. Fabrication and properties of polymer matrix composites by low-energy electron beam in-situ cured fiber placement process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(11): 121-127.
- [81] 张小辉, 段玉岗, 李超, 等. 超声压紧对低能电子束分层固化复合材料质量的影响[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(4): 134-139.

- Zhang Xiaohui, Duan Yugang, Li Chao, et al. Effect of ultrasonic compaction on quality of composite stepwise cured by low-energy electron beam[J]. Journal of Xian Jiaotong University, 2015, 49(4): 134-139.
- [82] 赵新明, 段玉岗, 张静静, 等. 辐射剂量分布对低能电子束分层固化复合材料层间剪切强度的影响[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(10): 84-89.
- Zhao Xinming, Duan Yugang, Zhang Jingjing, et al. Effect of dosage distribution on ILSS of composite stepwise cured by low-energy electron beam [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(10): 84-89.
- [83] 李俊斐, 王显峰, 肖军, 等. 网格化曲面的固定角度铺丝轨迹规划算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(9): 1410-1415.
- Li Junfei, Wang Xianfeng, Xiao Jun, et al. Trajectory planning of automated fiber placement for meshed surface in fixed angle algorithm[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2013, 25(9): 1410-1415.
- [84] 熊文磊, 肖军, 王显峰, 等. 基于网格化曲面的自适应自动铺放轨迹算法[J]. 航空学报, 2013, 34(2): 434-441.
- Xiong Wenlei, Xiao Jun, Wang Xianfeng, et al. Algorithm of adaptive path planning for automated placement on meshed surface[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(2): 434-441.
- [85] 方宜武, 王显峰, 肖军, 等. 基于变角度算法的复合材料翼梁自动铺丝[J]. 航空制造技术, 2014(16): 90-94.
- Fang Yiwu, Wang Xianfeng, Xiao Jun, et al. AFP of composite wing spar based on fiber steering algorithm [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(16): 90-94.
- [86] 赵聪, 陆楠楠, 闫西涛, 等. 自动铺丝用预浸丝制备工艺研究[J]. 固体火箭技术, 2014, 37(5): 718-723.
- Zhao Cong, Lu Nannan, Yan Xitao, et al. Research on the process of preparation of prepreg tow applied in automatic fiber placement [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2014, 37(5): 718-723.
- [87] 谢飞, 文立伟, 肖军, 等. 直接预浸法制备预浸纱的展纱宽度研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(6): 36-41.
- Xie Fei, Wen Liwei, Xiao Jun, et al. Research on the spread width of fiber bundle during the preparation of prepreg by direct impregnation method[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2015(6): 36-41.
- [88] 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(22): 72-75.
- Yang Huifang, Li Zhongkai, Jin Hui. Analysis of key component of large composites fiber placement machine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(22): 72-75.
- [89] 杨会芳, 金辉, 张永康, 等. 大型复合材料铺丝机模态分析[J]. 航空制造技术, 2010(22): 80-81.
- Yang Huifang, Jin Hui, Zhang Yongkang, et al. Modal analysis of large composite fiber placement machine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(22): 80-81.
- [90] 薛向晨, 梁宪珠, 常海峰, 等. 复合材料结构中的纤维路径及连续纤维的均布性[J]. 航空制造技术, 2010(24): 78-80.
- Xue Xiangchen, Liang Xianzhu, Chang Haifeng, et al. Fiber placement path and continuous fiber distributing equality for composites structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(24): 78-80.
- [91] 池召艳, 周晓芹. 国外复合材料纤维自动铺放编程软件的功能特点及分析[J]. 航空制造技术, 2014(12): 64-67.
- Chi Zhaoyan, Zhou Xiaoqin. Function characteristics and analysis of foreign programming software about composite automatic fiber placement[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(12): 64-67.
- [92] 葛新锋, 赵东标. 7自由度自动铺丝机器人参数化的自运动流形[J]. 机械工程学报, 2012, 48(13): 27-31.
- Ge Xinfeng, Zhao Dongbiao. Parameterized self-motion manifold of 7-DOF automatic fiber placement robotic manipulator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(13): 27-31.
- [93] 葛新锋, 赵东标, 陆永华, 等. 自动铺丝机器人动力学性能指标研究[J]. 中国机械工程, 2012(16): 1903-1907.
- Ge Xinfeng, Zhao Dongbiao, Lu Yonghua, et al. Study on dynamics performance index of automated fiber placement robotic manipulator[J]. China Mechanical Engineering, 2012(16): 1903-1907.
- [94] 尹纪龙, 沈景凤, 章志东. 复合材料自动铺丝轨迹规划[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(3): 8-12.
- Yin Jilong, Shen Jingfeng, Zhang Zhidong. Path planning for composite fiber placement[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composite, 2014(3): 8-12.
- [95] 胡宁国, 姬竹青. 复合材料铺丝工艺、软件及设备问题探讨[J]. 航空制造技术, 2014(16): 75-79.
- Hu Ningguo, Ji Zhuqing. Investigation of fiber placement technology, software and equipment for composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(16): 75-79.

