先进复合材料自动铺丝技术研究进展*

张小辉[1], 朱玉祥[1], 张少秋[1], 陈　波[1], 支　勉[2], 段玉岗[1]

（1. 西安交通大学，西安 710049；
2. 保定标正机床有限责任公司，保定 071000）

[摘要] 随着先进复合材料在航空航天领域广泛应用，复合材料自动铺丝技术受到了业界越来越多的关注。从复合材料自动铺丝头结构设计、自动铺丝控制技术和方法、自动铺丝工艺研究和自动铺丝 CAD/CAM 软件系统开发 4 个方面介绍了当前国内外自动铺丝技术的研究进展。进一步总结了国内自动铺丝装备和技术研究中存在的一些问题，探讨了国内自动铺丝技术需要深入研究的内容和发展方向。

关键词： 碳纤维增强复合材料；自动铺丝头；控制技术；铺丝工艺；CAD/CAM

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.07.054

张小辉

博士，从事先进复合材料自动铺丝工艺与装备研究 10 余年，先后研制出多台／套自动铺丝装备，申请发明专利 20 余项，在国内外学术刊物上发表研究论文 10 余篇，SCI 检索 6 篇。

* 基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金资助项目（XJJ2017160）；国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项（2017ZX04009001）；国家重点研发计划项目（2016YFB1100900）。

先进复合材料已成为新一代大飞机的主体结构材料，其在飞机上的用量和应用部位已经成为衡量飞机结构先进性的重要标志之一。波音 787、空客 A350 等大型飞机的复合材料用量已经达到 50% 以上，且在机身、机翼等关键结构采用了复合材料进行制造。随着飞机的大型化，飞机上所使用的复合材料构件的结构尺寸不断增大，用量也不断增多，用于制造大型复杂复合材料构件的自动铺丝技术获得了快速发展并得以工业化应用。自动铺丝技术兼备了纤维缠绕和自动铺带的优点，极大地提高了产品质量和可靠性，降低了产品报废率和辅助材料消耗，而且能够高效地制造出复杂型面的复合材料构件，实现了复合材料结构的“低成本、高性能”制造。本文对国内外自动铺丝技术的研究现状进行介绍，分析自动铺丝技术需要重点研发和突破的技术难点，促进我国自动铺丝技术的发展。

自动铺丝技术具备诸多优点，在国外航空航天领域获得了大量的工程应用，促进了国外航空航天领域的巨大进步。国内经过多年的发展，自动铺丝技术也取得了长足的进步，其中西安交通大学研制的 8 自由度机器人式自动铺丝机已经成功应用于中航复合材料有限责任公司某型飞机进气道的试制生产中，南京航空航天大学研制的设备也在相关航天企业中获得应用。但由于自动铺丝技术的复杂性，其涉及机械、电气、控制、复合材料工艺和软件等诸多领域，仍需要从基础方法、理论和应用技术等多方面深入研究。

自动铺丝头结构设计

为了满足不同结构类型和功能复合材料构件的自动化制造，国外的科研人员已经开发出了多种多样的自动铺丝装备。随着自动铺丝装备的不断发展，对其核心装置——自动铺丝头的研究也不断地深入细

致。University of Delaware 复合材料研究中心研发了 Automated Materials Placement（AMP）系统，该系统采用模块化和柔性化设计，具有多项功能，能够对热固性、热塑性、原位固化等一系列不同工艺和不同体系的复合材料材料进行自动铺放加工[1]。Sorrentino 等[2]开发了一种基于工业机器人的复合材料构件的自动铺放系统，能够实现变厚度复合材料构件的自动铺放制造，拓展了自动铺放技术的应用范围。

针对自动铺丝头装置中加热、压紧、输送、剪切等具体功能，研究人员也从机构和控制等方面展开研究。Oldani 等[3]发明了一种能防止在紧急停机情况下预浸丝束铺层过热的加热系统。该系统对加热区域的温度进行检测，根据检测结果对冷却装置进行控制，当温度高于设定温度时，启动冷却装置，能够确保自动铺丝头在工作过程中具有较好的加热效果，同时热源也不会影响铺丝头中其他零部件。Calawa 等[4]研究了采用红外灯装置加热预浸丝束铺层时，加热区域的温度场分布以及加热功率计算方法，结果表明在高速（> 50.8m/min）铺放加工下，红外加热装置能够确保模具和已铺放预浸丝束铺层的加热，最大加热温度为82.2℃。自动铺丝头中的红外加热装置如图 1 所示。同时，热氮气加热系统和激光加热等技术具有高效稳定的特点，也在复合材料自动铺放工艺中得到了应用。

相关学者研究了适形压紧机构，该机构用于制造具有双曲面特征的复杂复合材料构件，能够提供400~2800N 的压紧力，适用于电子束原位固化、热塑性复合材料固化和热固性复合材料铺放成型等多种工艺条件[5-6]。Steeg 等[7]对柔性压辊技术进行了研究，研制了基于弹性材料的柔性压辊，分析了压紧力方向与芯模曲面法线的不同夹角偏差对预浸带铺层间剥离强度的影响，并证明了采用柔性压辊有助于减小铺层角度偏差。Mischler 等[8]发明了多片式柔性压紧机构，该结构由多个压紧片组成，每个压紧片能够独立地施压，适用于铺放加工较大曲率型面特征的复合材料构件。典型的柔性压辊结构如图 2 所示。

Tingley[9]发明了一种预浸丝束重送装置，该系统采用杠杆机构驱动重送轮，具有结构紧凑、动作迅速的特点，能够满足高速铺放条件下对预浸丝束的精确输送。Hamlyn 等[10]发明了一种集剪切和夹持功能为一体的预浸丝束剪切机构，该机构直接安装在气动元件的末端，在刀具向下切断预浸丝束的同时，实现对已经切断的预浸丝束的夹持功能，具有结构紧凑，动作可靠的特点。Izco 等[11]研究了高速、复杂型面复合材料构件在自动铺放加工过程中的预浸丝束输送、剪切和夹持等问题，并提出了高效可靠的技术方案，使自动铺丝速度可达 85m/min。Devlieg 等[12]和 Oldani 等[13]从机械结构设计、伺服控制系统要求等方面研究了“On-the-fly”高速、高精度剪切系统，通过对剪切机构的优化，提高了剪切速度和成功率，大大提高了自动铺丝制造效率。

由上述分析可知，国外对自动铺丝机构进行了精细化和深入的研究，其目的在于进一步提高自动铺丝工艺的成型精度、效率、可靠性和应用范围。目前，国内的自动铺丝头设计也日臻完善。西安交通大学研制了纱架和铺丝头集成为一体的盘式铺丝头（用于机器人式自动铺丝机）和箱体式自动铺丝头（用于机床式自动铺丝机）（如图 3 所示），其工作可靠性、稳定性和工作效率获得实际工程检验，能够满足实际复合材料铺放加工需要。哈尔滨工业大学的相关学者从具体的结构方案和结构

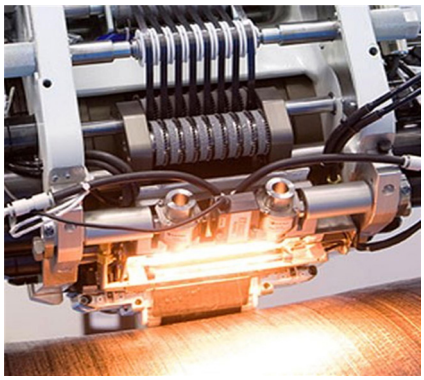
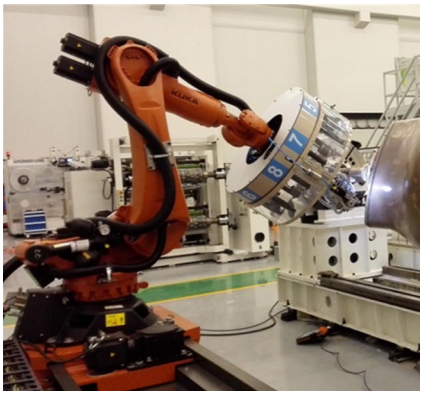


图1　自动铺丝头红外加热系统

Fig.1　Infrared heating system of AFP heat

图2　自动铺丝压紧机构

Fig.2　Compacting roller of AFP head



（a）机器人式自动铺丝机

（b）龙门式自动铺丝机

图3　西安交通大学开发的自动铺丝机

Fig.3　AFP machine by Xi’an Jiaotong University

强度设计方面对自动铺丝头中的剪切、重送、夹持和压实等机构进行了研究，并提出了丝束控制独立于运动控制的方法，实现了自动铺丝过程的有效控制，取得了丰硕的研究成果[14-16]。南京航空航天大学的赵增林[17]对在自动铺丝装备研制过程中自动铺带头结构和自动铺丝头结构所存在的问题进行了详细的研究，并针对工艺过程对机械结构的影响提出了解决方案，使自动铺放机构的加工精度和铺放效率有效提升，自动铺放控制系统得到简化。

目前，法国 Coriolis 公司新型的铺丝头可以兼容铺放热固性、热塑性和干纤维，只要更换相应的加热模块，就能够一头多用。西班牙 Mtorres 公司推出了铺丝头和纱箱一体化的新型铺丝头。美国 ElectroImpact 公司开发出可自动更换的铺丝头，类似于金属切削数控加工中心中自动换刀功能一样，铺放加工时可以根据需要，将不同的铺丝头快速更换，减小换料时间，提高铺放效率。美国 Ingersoll 公司研制的铺丝头与纱箱采用多自由度关节连接，在减小纱箱与铺丝头连接距离的同时使铺丝头具备更大的自由度，适合于复杂凹模的铺放成型。

根据纱箱送纱方式的不同，自动铺丝装备可分为内置纱箱式（集成纱箱式）和外置纱箱式（分离纱箱式）两大类。内置纱箱一般指纱箱和铺丝头集成为一体，将对预浸丝束的操作都集中到铺丝头中，包括预浸丝束开卷、背衬膜收集，预浸丝束导向，张力控制，纱箱温湿度控制，以及夹持、重送、剪切、加热和压紧等铺放动作。内置纱箱式铺丝头具有穿丝方便，铺放运动灵活，便于维护等优势，适合于曲率变化较大的复杂型面复合材料构件的制造。但是由于纱箱与铺丝头集成为一体，导致铺丝头结构较大，纱箱的存储量有限，通过自动铺丝头的整体快速更换能够在很大程度上克服该问题。美国 EI 公司研制的自动铺丝头，以及美国 Ingersoll 公司的 Mongoose 系列自动铺丝头和西班牙 Mtorres 公司最新研制的自动铺丝头均采用了内置纱箱式结构，国内西安交通大学研制的自动铺丝头也采用了内置纱箱式结构。

外置纱箱一般指纱箱和铺丝头结构分离，在二者之间有较长的输送通道。其优点在于由于外置纱箱无需和铺丝头做同步运动，可以采用更大的纱箱结构，能够容纳下更多的预浸丝束，多用于预浸丝束数量大于 16 束的自动铺丝装备。但是在纱箱和铺丝头之间需要复杂的低阻尼、长距离输送通道和丝束导向系统，以防止铺丝头在进行运动时预浸丝束之间的互相干扰。并且使用过程中穿丝、维护均比较复杂，影响铺放效率。法国 Coriolis 公司和美国 Ingersoll 公司研制的 Lynx 系列铺丝头采用外置纱箱结构。

自动铺丝头是自动铺丝装备的核心，而机械结构又是自动铺丝头的基石。尽管各种自动铺丝头的功能基本一致，即均包括对预浸丝束的重送、夹持、剪切、压紧和预热 / 固化等基本功能和动作，但对于自动铺丝头的结构设计还没有完善的设计方法进行指导，对于各种基本自动铺丝动作原理还没有进行更加深入的分析。因此有必要基于现代机械设计理论和铺丝动作原理模型，对自动铺丝头和预浸丝束输送装置（纱箱）等自动铺丝装备中的功能和关键结构进行系统地分析，以提出用于指导自动铺丝头结构设计的指导原则和设计方法，满足自动铺丝头高效、高精度的研制要求。

自动铺放控制技术和方法

在自动铺丝工艺过程中，需要对铺丝动作，关键工艺参数和铺丝运动路径进行控制，通过自动控制理论和方法的研究，提高自动铺放过程的协调性和控制精度，同时辅以预浸丝束铺放质量在线检测系统，以实现高质量的复合材料构件自动铺丝成型制造。

在自动铺丝关键工艺参数控制方面，Sorrentino 等[2]分析了自动铺带传动比和速度匹配算法，该算法根据预浸带料卷转动阻力矩、预浸带料卷收卷力矩、预浸带料卷半径、背衬纸料卷半径、预浸带料卷旋转角度和背衬纸料卷旋转角度等参数建立预浸丝束料卷的张力数学模型，采用 PID 控制算法实现了工业机器人式自动铺带机预浸带的张力控制。Black 等[18]发明了一种适用于高速自动纤维铺放的控制系统，除了对自动铺丝动作的实时控制外，该系统还采用温度反馈算法控制预浸带加热温度，效果良好。Lichtenwalner[19]研究了基于 CMAC（Cerebellar Model Articulation Controller）神经网络的自动铺丝温度控制系统，研究结果表明具有自学习功能的神经网络控制器的控制性能优于传统 PI 控制器。

在自动铺丝路径控制方面，Yan 等[20]采用微分几何理论，研究了自动铺丝路径控制方法，实现了自由曲面构件自动铺丝过程中压辊路径的精确控制算法。该算法能够实现在自动铺放过程中，使预浸丝束之间的间隙和搭接最优化，从而提高复合材料构件的成型质量。Martinec 等[21]通过机器人位姿矩阵算法计算复杂三维构件的自动铺丝路径，并通过试验验证了该算法的有效性。

哈尔滨工业大学的王志斌[22]研究了基于 DSP 的自动铺丝机控制系统，以 DSP 为控制单元搭建了张力控制系统，实现了对预浸丝束张力的有效控制。南京航空航天大学的孙天峰[23]研究了自动铺丝过程中预浸丝束张力和温度的控制方法，提出了采用闭环速度模式的积分分离式 PID 控制并引入根据铺放速度和放料轴半径变化补偿伺服电机转速的

控制方案，实现了预浸丝束张力的控制。同时采用控制系数法对自动铺丝过程的加热温度进行了控制。

自动铺丝质量在线检测方面，美国 EI 公司采用激光器对铺放边界精度和铺放角度进行在线监控。国内，西安交通大学提出一种针对碳纤维丝束带剪断状态的电信号检测方法，并采用高速图像识别技术获取铺放过程中每根丝束的宽度，用于在线检测丝束打捻和夹杂缺陷[24-25]，南京航空航天大学研究了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，实现了自动铺带在线质量检测与测控；武汉理工大学在机器视觉技术的基础上自动检测自动铺丝的铺放角度和间距[26]。

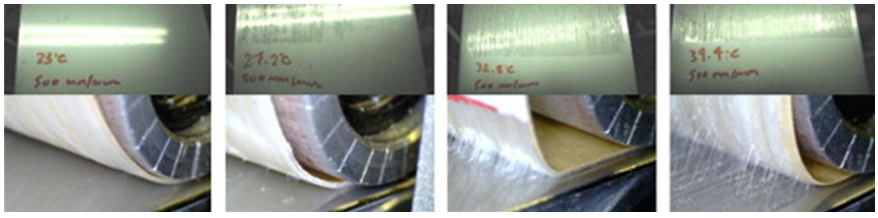
目前，国外自动铺丝装备控制系统均建立在已有成熟的工业数控系统中，如 SIEMENS、FANUC 等数控系统，通过在标准的 G 代码编程基础上进行二次开发，开发出用于自动铺丝的指令系统。国内西安交通大学基于 KUKA.CNC 和 SIEMENS 840Dsl 系统开发出了自动铺丝控制指令系统，华中数控公司也基于国产数控系统进行了自动铺丝控制系统的开发。在自动铺丝关键工艺参数控制方法和技术的研究中，研究目的多聚焦在控制算法和实现该控制算法的技术手段上，而对需要控制的工艺参数本身的特点没有充分考虑。同时，也很少有对自动铺丝过程中的工艺参数控制方法进行比较全面的研究，如科研人员研究了自动铺丝工艺过程中的预浸丝束张力控制和铺层加热温度控制，而对自动铺丝的基本动作和作用力控制等研究较少。因此，系统地研究自动铺丝工艺中基本铺丝动作逻辑时序关系，以及预浸丝束张力、铺层加热温度和压紧力等关键工艺参数的控制方法，有助于改善自动铺丝头的可靠性，提高自动铺丝成型精度和工艺质量。

自动铺丝工艺研究

为了制造出高质量复合材料构件，科研人员对自动铺丝工艺方法也开展了大量的研究。Croft 等[27]研究了自动铺丝工艺过程中引入的间隙、重叠等缺陷对复合材料性能的影响。研究结果表明在预浸丝束自动铺放过程中引入的制造缺陷对复合材料力学性能指标有着不同的影响规律，对某一项指标有提高的同时就会使另外一项指标下降，其性能影响范围为 5%~13%。Perner 等[28]研究了工业环境中的振动对铺丝精度和速度的影响，并通过振源数据分析优化了自动铺丝制造车间的结构布局，以确保采用自动铺丝技术所制造的复合材料构件具有良好的成型精度。Crossley 等[29-31]研究了预浸带黏度对自动化铺放过程的影响（如图 4 所示），以及预浸带黏度和刚度随着温度的变化规律，结果表明通过控制温度使预浸带达到合适的黏度和刚度将有利于制造效率的提高。Muric-Nesic[32] 和 Gutiérrez 等[33]研究了通过高频机械振动的方法对预浸丝束铺层进行压紧，用来消除铺层在铺放过程中引入的孔隙，以提高复合材料构件的制造质量。Nagelsmit 等[34]研究了采用自动铺丝工艺制造编织结构复合材料构件的新方法，该方法通过自动铺丝技术实现编织结构复合材料的制作，结果表明该工艺能够提高复合材料构件的冲击性能。

同样，紫外光、电子束等原位辐射固化工艺结合自动铺丝技术也是新型复合材料自动化制造工艺的研究热点[35-41]。Dilimulati, Di Pietro, Duan 等研究了 UV 固化与纤维铺放技术相结合的复合材料构件分层制造新工艺，该工艺采用紫外光对复合材料试件进行分层固化（如图 5 所示），材料成型与固化一步完成，无需热压罐。电子束固化先进复合材料已经应用在装甲车侧挡板、汽车部件制造、导弹壳体、飞机进气管道、航天器以及飞机零部件修复等领域。国内，北京航空航天大学、北京航空材料研究院等单位也开展了电子束固化复合材料的研究工作。典型的低能电子束源如图 6 所示。热塑性复合材料具有可回收重复利用、环保性能好、性能稳定等优点，结合自动铺丝工艺的高效低成本制造技术，也是具有广泛应用前景的一种新工艺[42-44]。

基于自动铺丝技术，研究人员开发了多种复合材料制造新工艺和方法，其目的是提高复合材料构件的自动化制造水平，提高采用自动铺丝工艺制造复合材料构件的性能，并且降低复合材料构件的制造成本。国内



（a）23℃　（b）27℃　（c）33℃　（d）39℃

图4　温度对预浸带黏性的影响

Fig.4　Pictures of viscosity of prepreg at different heating temperature

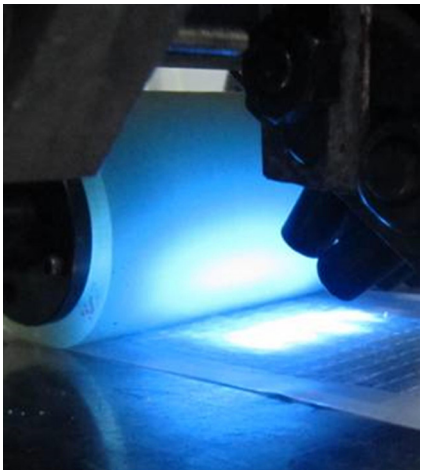


图5　紫外光固化源

Fig.5　UV-curing LED

图6　低能电子束源
Fig.6　Low-energy electron beam device

应加快自动铺丝装备的研究，装备是有效地开展工艺研究的基础。通过自动铺丝工艺的研究来促进自动铺丝装备的改进和优化，二者相辅相成，共同加快我国自动铺丝技术的发展。

自动铺丝 CAD/CAM 软件系统

目前国外已经积累了成熟的轨迹规划算法并开发了相应软件。自然路径法（Natural Path）是较早提出的自动铺丝轨迹规划算法，该算法能够确保预浸丝束在铺放过程中变形最小，通过多次投影近似求解“自然路径”，能够较好地保证轨迹间距；可变铺放方向的轨迹生成算法，利用铺层角度构建分段函数计算参考路径，并通过平移得到参考线族，该算法对于简单曲面具有较好的效果；Hale 等[45]在此基础上以 0° 轨迹为基础构造分段曲线，通过拟合得到初始参考线，提高了轨迹生成效率；莫纳什大学的 Shirinzadeh 等[46-47]在开放连续零件表面的轨迹生成方面提出了自动纤维铺放表面曲率算法，该算法旨在生成没有间隙和重叠的铺层，在轨迹间距方面达到了良好的效果；荷兰学者[48-50]均按主应力方式生成轨迹线，通过函数定义生成铺放角度线性变化的轨迹线，具有清晰的轨迹前期定义方法，可以通过对铺放角度线性变化速率的改变设计不同强度的复合材料。

在充分进行算法研究的基础上，国外的软件开发公司开发出了多种自动铺丝 CAD/CAM 软件，包括：美国 VERICUT 公司的 VCP&VCS 复合材料铺层设计和铺放仿真软件，美国 VISTAGY 公司的 FiberSIM 软件，欧洲 Airbus 公司运用 CATIA CAA V5 技术开发的 TapeLay 软件[51]等。这些软件一般都具有铺层分析、铺放轨迹生成和自动铺放仿真等功能，已经大量应用于复合材料构件生产中。

近些年，国内的科研人员也提出了多种自动铺丝轨迹规划算法。李善缘等[52]提出了由一组数据点拟合样条曲线正交投影到铺放曲面作为初始参考线的方法；卢敏等[53]根据待铺放曲面及铺放角度，通过构造平面与偏置曲面相交得到参考线；韩振宇等[54]以 S 形进气道模型的四边形网格线作为参考线；邵冠军等[55]提出了按构件主应力大小和方向构造基于等距线和等分点的轨迹规划设想，通过应力方向线拟合得到轨迹线；党旭丹等[56]提出了基于测地线的平行等距规划算法；李俊斐等[57]提出了网格化曲面固定角度自动铺丝轨迹规划算法；熊文磊等[58]也构造了一种网格化算法，该算法基于测地线和实际可铺放性生成轨迹。

由于国内纤维铺丝轨迹规划技术研究起步较晚，且缺乏相应成熟的铺放装备及工艺条件，因此轨迹规划算法和相关的软件开发仍处于初步探索研究之中。软件系统的发展同样需要装备和工艺的支撑。西安交通大学近年来开发了多台自动铺丝装备，通过对自动铺丝装备和工艺不断地研究和总结，基于 CATIA 开发了自动铺丝轨迹规划软件和后处理软件，验证了纤维铺放轨迹规划算法的可行性[59-60]，初步实现了自动铺丝 CAD/CAM 软件系统的开发。图 7 为西安交通大学自主开发 CAD/CAM 系统生成的复杂型面复合材料构件自动铺丝路径。未来需要不断完善算法，提高算法效率，形成系统的自动铺丝 CAD/CAM 软件。

国内存在的问题和发展方向

随着复合材料用量的增多，国内以人工铺叠为主的制造工艺远远不能满足实际的生产需要。自动铺丝技术的应用是对传统生产工艺体系的提升，需要从复合材料结构设计、预浸丝束材料体系、自动铺丝装备和工艺、CAD/CAM 软件、模具设计制造等方面综合推进，才能使我国复合材料制造水平上一个新的台阶。经过多年的研发，国产自动铺丝装备已经

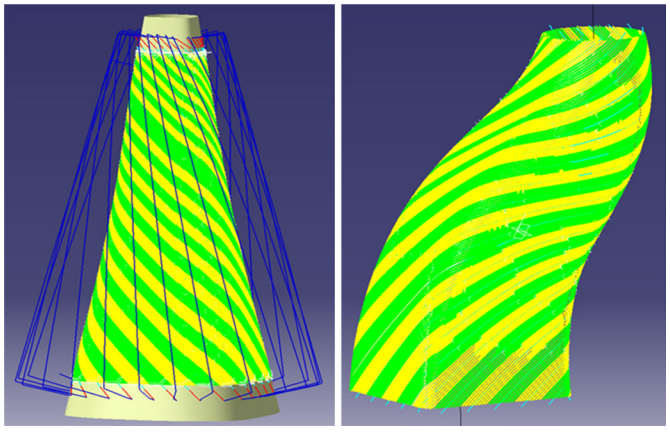


图7　复杂型面复合材料构件自动铺丝路径
Fig.7　AFP trajectories of complex surface composite

实现了工程化应用，仍然需要从以下5个方面入手开展研制工作，期望加快追赶国外先进复合材料制造工艺的脚步。

（1）自动铺丝装备结构设计。对于自动铺丝运动高速、大惯量的驱动要求，国外自动铺丝机结构进行了针对性的设计，最大铺丝速度可达60m/min以上。国内由于缺乏自动铺丝机设计制造经验，常以金属切削机床作为参考进行设计，不能满足自动铺丝高速、大惯量的要求，铺丝速度一般不超过30m/min。因此，需要针对自动铺丝机床结构设计开展专门的研究，设计出满足多自由度、高速、大惯量要求的自动铺丝机床结构。

（2）自动铺丝装备的智能化控制。国内研制的自动铺丝头已经能够可靠地实现自动铺丝功能，但是在自动铺丝过程的在线检测，包括断纱、缺纱、缺陷、边界检测，模具的自动标定，温湿度精确控制、预浸丝束张力的精确控制等方面与国外还有一定差距。需要进一步完善自动铺丝控制系统，提高控制精度，不断提高装备的智能化程度，减少操作人员的操作难度。

（3）高精度自动铺丝头研制。国产自动铺丝头铺放精度为±2.5mm，虽然与国外装备的技术指标一致，但国外装备精度一般实际能够达到±1mm左右，且稳定性良好。这就需要在自动铺丝头机械结构精度和铺丝动作控制精度方面进行深入研究，提高国产自动铺丝头铺放精度。

（4）自动铺丝工艺的研究。国外基于自动铺丝技术开发的热塑性材料、干纤维铺放等技术也进行了大量的应用。而国内相关研究目前还在起步阶段，但是有了热固性材料的自动铺丝技术良好的基础，有望能够快速实现热塑性材料和干纤维铺放技术的突破。另外，国产预浸丝束质量稳定性，自动铺丝过程中间隙、搭接、打捻，褶皱等对最终制品服役性能的影响等方面也需要进行深入研究，以加快国产自动铺丝装备的实际应用。

（5）CAD/CAM软件系统开发。国外已经发展出功能完备的商用自动铺丝CAD/CAM软件，国内软件系统初具雏形，需要从算法效率，工艺支撑和后置处理仿真等环节不断完善。特别是针对复杂型面复合材料构件，如飞机进气道等复合材料构件开发出适应性更强的路径规划算法。

结论

航空工业是国家战略性产业，被称为“现代工业之花”，而大飞机更是代表和体现了一个国家的综合国力。随着运20、C919和AG600等大飞机的成功研制，我国航空工业的制造实力也不断增强。但是与发达国家相比，先进复合材料构件的高质量成型制造仍然是制约我国航空制造工业快速发展的技术瓶颈之一。为了提高我国的航空航天工业中先进复合材料构件的制造水平，必须加快自主研制高性能的自动铺丝装备和配套技术，从而促进我国航空航天工业和复合材料产业的不断进步和发展。

参考文献

[1] TIERNEY J, WEBER R, SHEVCHENKO N, et al. Development of an automated materials placement (AMP) system for composite processing[C]//Proceedings of SAMPE 2012. Covina: SAMPE, 2012.

[2] SORRENTINO L, CARRINO L, TERSIGNI L, et al. Innovative tape placement robotic cell high flexibility system to manufacture composite structural parts with variable thickness[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2009, 131(4): 410021–410028.

[3] OLDANI T, GOEBEL D. System and method for heating carbon fiber using infrared radiation in a fiber placement machine: US7731816[P]. 2007–08–06.

[4] CALAWA R, NANCARROW J. Medium wave infrared headter for high–speed fiber placement[R]. SAE Technical Paper, 2007–01–3842, 2007.

[5] LAMONTIA M A, GRUBER M B, WAIBEL B J, et al. Conformable compaction system used in automated fiber placement of large composite aerospace structures[C]//Proceedings of 23rd SAMPE conference. Paris, 2002.

[6] GENSSEN M. Pressing apparatus and pressing and depositing system for depositing a sliver on a double–curved surface, and use and method: US8394223 B2[P]. 2011–09–22.

[7] STEEG M, SCHLEDJEWSKI R, SCHLARB A K. Automation implementation and process development of thermoplastic tape placement for 3–dimensional parts[J]. SAMPE Journal, 2006, 42(5): 18–24.

[8] MISCHLER P L, TINGLEY M, HOFFMANN K. Compaction roller for a fiber placement machine: US7810539 B2[P]. 2010–10–12.

[9] TINGLEY M C. Add roller for a fiber placement machine: US2007/0044899 A1[P]. 2007–03–01.

[10] HAMLYN A, HARDY Y. Applicator head for fibers with particular systems for cutting fibers: US2008/0216963A1[P]. 2008–09–11.

[11] IZCO L, ISTURIZ J, MOTILVA M , et al. High speed tow placement system for complex surfaces with cut/clamp & restart capabilities at 85 m/min (3350 IPM)[C]//Proceedings of SAE Aerospace Manufacturing and Automated Fastening Conference and Exhibition. Toulouse, 2006.

[12] DEVLIEG R, JEFFRIES K, VOGELI P. High–speed fiber placement on large complex structures[R]. SAE Technical Paper, 2007–01–3843, 2007.

[13] OLDANI T, JARVI D. Performing high–speed events “on–the–fly” during fabrication of a composite structure by automated fiber placement: US 7513965[P]. 2005–11–11.

[14] 张凤强. 纤维铺放设备中铺丝头的关键技术研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2011.

ZHANG Fengqiang. Research on key technologies of fiber placement head in fiber placement equipment[D]. Herbin: Harbin Institute of Technology, 2011.

[15] 胡发存. 自动铺带头结构设计及其超声切割技术研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2014.

HU Facun. Mechanical design of automatic tape laying head and ultrasonic cutting technology research[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[16] 邵忠喜. 纤维铺放装置及其铺放

关键技术研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2010.

SHAO Zhongxi. Research on key technology of fiber placement machine[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

[17] 赵增林. 典型自动铺放系统的机构改进及 CAM 技术研究 [D]. 南京：南京航空航天大学，2011.

ZHAO Zenglin. Research on structure improvement and cam technology of typical automated placement system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.

[18] BLACK S E, PADO L E. System, method, and computer program product for providing control for high speed fiber placement: US2003/0102070A1[P]. 2003-06-05.

[19] LICHTENWALNER P F. Neural network-based control for the fiber placement composite manufacturing process[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 1993, 2(5): 687-692.

[20] YAN L, CHEN Z C, SHI Y, et al. An accurate approach to roller path generation for robotic fibre placement of free-form surface composites[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2014, 30(3): 277-286.

[21] MARTINEC T, MLÝNEK J, PETRŮ M. Calculation of the robot trajectory for the optimum directional orientation of fibre placement in the manufacture of composite profile frames[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2015, 35(15): 42-54.

[22] 王志斌. 基于 DSP 的自动铺丝机张力控制系统开发 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2013.

WANG Zhibin. Exploitation on tension control system of fiber placement machine based on DSP[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

[23] 孙天峰. 自动铺丝的铺放温度和张力控制技术研究 [D]. 南京：南京航空航天大学，2014.

SUN Tianfeng. Research on temperature and tension control technology of automated fiber placement[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.

[24] TAO Y C, JIA S, DUAN Y, et al. An online detection method for composite fibre tow placement accuracy[C]//Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture. London: Institution of Mechanical Engineers, 2016, 230(9): 1614-1621.

[25] 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 [J]. 西安交通大学学报，2015, 49(12): 112-116.

TAO Yicun, JIA Shuhai, DUAN Yugang, et al. Rapid cut state detection for carbon fiber composite tow[J]. Journal of Xi' an Jiaotong University, 2015, 49(12): 112-116.

[26] 黄文宗，孙容磊，张鹏，等，国内复合材料自动铺放技术发展 [J]. 航空制造技术，2014, 57(16): 85-89.

HUANG Wenzong, SUN Ronglei, ZHANG Peng, et al. Development of automated placement technology for composite material[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(16): 84-89.

[27] CROFT K, LESSARD L, PASINI D. Experimental study of the effect of automated fiber placement induced defects on performance of composite laminates[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(5): 484-491.

[28] PERNER M, KROMBHOLZ C, BOCK M, et al. Clarifying vibrational issues of an advanced automated fiber placement production plant[C]//Proceeding of 2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). NewYork: IEEE, 2012.

[29] CROSSLEY R J, SCHUBEL P J, WARRIOR N A. The experimental determination and control of prepreg tack for automated manufacture[J]. Plastics Rubber & Composites, 2010, 40(6/7): 363-368 .

[30] CROSSLEY R J, SCHUBEL P J, WARRIOR N A. Development of ATL and materials for low cost production[C]. Proceedings of the 18th International Conference on Composite Materials. Jeju, 2011.

[31] CROSSLEY R J, SCHUBEL P J, WARRIOR N A. The experimental determination of prepreg tack and dynamic stiffness[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012, 43(3): 423-434.

[32] MURIC-NESIC J, COMPSTON P, STACHURSKI Z H. On the void reduction mechanisms in vibration assisted consolidation of fibre reinforced polymer composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(3): 320-327.

[33] GUTIÉRREZ J, RUIZ E, TROCHU F. High-frequency vibrations on the compaction of dry fibrous reinforcements[J]. Advanced Composite Materials, 2013, 22(1): 13-27.

[34] NAGELSMIT M, KASSAPOGLOU C, GURDAL Z. AP-PLY: A new fibre placement architecture for fabric replacement[J]. SAMPE Journal, 2011, 47(2): 36-45.

[35] GOODMAN D L, BYRNE C A, YEN A, et al. Automated tape placement with in-situ electron beam cure[J]. SAMPE Journal, 2000, 36(2): 11-17.

[36] HAIGHT A E H, WESSON S P. E-eam automated tape placement technology for high temperature composites[C]//The Proceedings of 52nd SAMPE Symposium and Exhibition, Baltimore, 2007.

[37] DI PIETRO A, COMPSTON P. Shear properties of a glass-fibrevinylester composite cured with high intensity ultraviolet light for use in automated manufacturing processes[J]. Advanced Composite Letters, 2011, 20(2): 45-48.

[38] ABULIZI D, DUAN Y G , LI D, et al. A new method for glass-fiber reinforced composites manufacturing: Automated fiber placement with in-situ UV curing[C]//IEEE International Symposium on Assembly & Manufacturing. New York: IEEE , 2011.

[39] ZINI E, SCANDOLA M. Green composites an overview[J]. Polymer Composites, 2011, 32(12): 1905-1915.

[40] COQUERET X, KRZEMINSKI M, PONSAUD P, et al. Recent advances in electron-beam curing of carbon fiber-reinforced composites[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2009, 78(7/8): 557-561.

[41] 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, 54(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, 54(15):45-48.

[42] AUGUST Z, OSTRANDER G, MICHASIOW J, et al. Recent developments in automated fiber placement of thermoplastic composites[J]. SAMPE Journal, 2013, 50(2): 30-37.

[43] DEVRIES H. AFP technologies for high performance thermoplastics: characterization of mechanical performance and output rate[C]// Proceedings of the 6th SAMPE International Technical Conference. SETEC Leiden, 2011.

[44] QURESHI Z, SWAIT T, SCAIFE R, et al. In situ consolidation of thermoplastic prepreg tape using automated tape placement technology: Potential and possibilities[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 66: 255-267.

[45] HALE R D, MOON R S, LIM K, et al. Current progress on integrated design and analysis tools for fiber steered composites: Technical report N00014-00-1-0415[R]. Lawrence: University of Kansas Center for Research, Inc.,

2004.

[46] SHIRINZADEH B, CASSIDY G, OETOMO D, et al. Trajectory generation for open-contoured structures in robotic fibre placement[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2007, 23(4): 380-394.

[47] SHIRINZADEH B, ALICI G, FOONG C W, et al. Fabrication process of open surfaces by robotic fibre placement[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2004, 20(1): 17-28.

[48] LOPES C, GÜRDAL Z, CAMANHO P. Tailoring for strength of composite steered-fibre panels with cutouts[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2010, 41(12): 1760-1767.

[49] GÜRDAL Z, TATTING B F, WU C K. Variable stiffness composite panels: effects of stiffness variation on the in-plane and buckling response[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39(5): 911-922.

[50] BLOM A W, ABDALLA M M, GÜRDAL Z. Optimization of course locations in fiber-placed panels for general fiber angle distributions[J]. Composites Science and Technology, 2010, 70(4): 564-570.

[51] 薛企刚. 高效、全自动的碳纤维复合材料铺放设备 [J]. 航空制造技术,2008, 51(4): 53-56.

XUE Qigang. High efficiency and full automatic CFRP fiber placement machine[J] Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(4): 53-56.

[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(2): 25-29.

LI Shanyuan, WANG Xiaoping, ZHU Lijun. Path planning for composite fiber placement[J]. Aerospace Materials and Technology, 2009(2): 25-29.

[53] 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.

[54] 韩振宇 , 邵忠喜 , 富宏亚 , 等. S 型进气道纤维铺放轨迹网格化生成 [J]. 航空制造技术 ,2009, 52(19): 72-78.

HAN Zhenyu, SHAO Zhongxi, FU Hongya, et al. Meshing method of fiber placement track for S-shaped inlet[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009, 52(19): 72-78.

[55] 邵冠军 , 游有鹏 , 熊慧. 自由曲面构件的纤维铺放路径规划 [J]. 南京航空航天大学学报 , 2005, 37(11): 144-148.

SHAO Guanjun, YOU Youpeng, XIONG Hui. Optimal fiber placement paths for free-form surface parts[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 37(11): 144-148.

[56] 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.

[57] 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(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(9): 1410-1415.

[58] 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.

[59] 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.

[60] 段玉岗 , 葛衍明 , 孟洋 , 等. 基于角度与间距可控的纤维铺放轨迹规划 [J]. 航空学报 , 2015, 36(10): 3475-3482.

DUAN Yugang, GE Yanming, MENG Yang, et al. Trajectory planning of fiber placement based on controlled angle and interval[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(10): 3475-3482.

通讯作者: 段玉岗,博士、教授,研究方向为先进复合材料自动铺丝及增材制造技术,E-mail: ygduan@xjtu.edu.cn。

Research Progress on Automated Fiber Placement Technology

ZHANG Xiaohui[1], ZHU Yuxiang[1], ZHANG Shaoqiu[1], CHEN Bo[1], ZHI Mian[2], DUAN Yugang[1]

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Baoding Biaozheng Machine Tool Co., Ltd., Baoding 071000, China)

[ABSTRACT] With widely applications of advanced CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer/Plastic) in the aerospace industy, the automated fiber placement (AFP) technology has attracted more and more attention from the industries. Four aspects of the research progress on AFP technology at home and abroad are introduced, including: the AFP head mechanical design, the AFP automatic control technology and system, the AFP process research and the AFP CAD/CAM software development. Moreover, the existing technique problems of the AFP technology developing at home are summarized, and the research content and development direction are discussed.

Keywords: Carbon fiber reinforced polymer/plastic(CFRP); AFP head; Control system; AFP process; CAD/CAM

（责编　铃兰）