

三维纺织技术 在航空航天领域的应用

天津工业大学复合材料研究所先进纺织复合材料教育部工程研究中心 陈利



陈利

工学博士,天津市特聘教授,博士生导师。主要从事三维纺织复合材料科学技术基础与应用的研究和教学工作,先后承担或参加完成了7项国家重大科研项目,50余项天津市科委、天津市教委以及航空航天等部门委托的科研项目,曾获国家科技进步二等奖2项、省部级奖5项、发表学术论文38篇。

在航空航天领域对高性能复合材料新需求的推动下,从20世纪80年代起,三维纺织技术得到了迅速发展。采用三维纺织预成型体增强的复合材料,具有优异的综合力学性能、更高的损伤容限以及卓越的抗烧蚀性能,为复合材料应用于主承力结构件和多功能结构件提供了广阔的前景。天津工业大学是国内首家研

在航空航天领域对高性能复合材料新需求的推动下,从20世纪80年代起,三维纺织技术得到了迅速发展。采用三维纺织预成型体增强的复合材料,具有优异的综合力学性能、更高的损伤容限以及卓越的抗烧蚀性能,为复合材料应用于主承力结构件和多功能结构件提供了广阔的前景。

制开发三维纺织技术的单位,拥有先进的技术装备和核心技术,是目前国内唯一具备材料设计、纺织预成型、树脂基复合成型等全过程技术的先进纺织复合材料科研和生产单位,研发的产品广泛应用于我国航空航天领域。

高性能复合材料轻质、高强的特点可以有效减轻飞行器自身重量,使飞行器飞得更快、更远,并提高飞行器隔热、透波、隐身等功能,对推进飞行器现代化起着十分关键的支撑作用。复合材料的用量已成为衡量各国飞行器先进水平的标志:空客A380采用了25%的复合材料,而波音B787飞机的复合材料用量已达到50%。“十一五”期间,高性能复合材料及复合结构部件制备技术已作为我国新一代飞行器轻量化、高性能化的关键技术而列入我国科技发展规划,并亟待进一步提高。

三维纺织复合材料技术作为一

种新型高性能复合材料结构部件的制备技术,是将增强纤维编织成复合材料结构件的近净形三维整体织物(纺织预成型体),再采用树脂传递模塑工艺(RTM)注入树脂后复合固化形成高性能复合材料结构件。由于采用了三维整体织物作为增强体,复合材料在厚度方向上获得了增强,从而克服了传统层合复合材料容易分层破坏的缺点,具有优异的力学性能。随着三维纺织技术的发展,不仅可以净体制备形状复杂、不同尺寸的异型构件,实现结构的一体化设计,减少零配件数量,保证结构的整体性,而且增强纤维在复合材料中呈空间多向分布,使复合材料的性能设计更具灵活性,实现了材料的“特定设计”。

三维纺织技术

纺织预成型体是复合材料的结构增强骨架,它的作用类似于建筑物

中的钢结构框架。在复合材料结构成型之前,利用纺织技术将增强纤维定位分布,形成二维(2D)或三维(3D)的织物与结构。与二维纺织预成型体相比,三维纺织预成型体内纤维在三维方向上相互交织,形成一个整体的空间网状结构,因而从结构上强化了复合材料,并显著提高了复合材料的性能。采用三维织物增强的树脂基复合材料的冲击损伤面积是二维织物层合复合材料的1/10;三维织物增强的碳基复合材料的拉伸强度是纯石墨材料的5~8倍;三维织物增强的陶瓷基复合材料的弯曲强度是二维织物层合复合材料的1.5倍。由于三维纺织预成型体在复合材料制造中的重要性,1985年由美国航空航天局(NASA)实施了先进复合材料技术(ACT)发展计划,大力发展了多种三维纺织技术以及树脂传递模塑工艺(RTM),以制造少(无)连接、大型、复杂、整体结构的复合材料制件,形成了复合材料结构一体化技术。

用于复合材料预成型体制备的三维纺织技术主要包括三维编织技术、三维机织技术和三维针织技术等。

1 三维编织技术

三维编织技术源于Florentine在1982年提出的“Magnaweave”编织方法。即每一根编织纱线由一个携纱器单独控制,携纱器按一定的规律运动,使编织纱线在三维空间内相互交织交叉,形成具有一定形状和尺寸的整体预成型体。基本的三维编织工艺制备的预成型体内有4种空间倾斜分布的编织纱线,我们称之为三维四向编织结构。在编织过程中,可根据需要分别在长度、宽度和厚度方向上加入伸直的纱线,这样就可以形成三维五向、三维六向和三维七向编织结构。此外,三维编织过程中可通过改变携纱器的排列形状和增减编织纱线的数量等工艺方法,灵

活地编织出各种形状的预成型体。

1994年,美国Atlantic Research公司研制的圆型三维编织机可挂14000根纱线;1996年,天津工业大学研制的计算机控制的方型三维编织机可挂4万根纱线,是国内目前最大、最先进的编织设备,可编织工字梁、T形梁、L形梁等多种形状的预成型体。此外,由于一台编织机所能编织的预成型体的几何尺寸具有一定的局限性,为此,天津工业大学成功研制了组合式三维编织机,标准化的编织单元可以灵活的进行组合,以满足不同形状和尺寸制件的编织需要。

2 三维机织技术

三维机织技术利用多层经纱织造方法,将若干经纱和纬纱层相互接结而形成具有一定厚度的三维整体预成型体。其中,采用分层接结的方法,将各相邻纱线层进行接结,称为层层角联锁结构,也称2.5D机织结构;采用接结纱倾斜贯穿整个厚度的方法,将全部纱线层进行接结,称为贯穿角联锁结构;采用一组纱线垂直贯穿整个厚度的方法,将全部纱线层进行接结,称为正交接结结构。三维机织预成型体中仅含有经向和纬向纱线,非常适合织造具有一定厚度的宽幅织物。天津工业大学对三维机织设备进行了全面的改造和升级,经过改造后的织机可以织造圆型和异型预成型体,最大厚度可达50mm。

3 三维针织技术

三维针织技术是利用针织线圈将若干层平行伸直的衬垫纱捆绑在一起,形成具有一定厚度的三维整体预成型

体。天津工业大学已成功研制出了一台双轴向纬编织物织造设备,如图1所示,织物幅宽达到2.7m。双轴向纬编织物采用双面罗纹组织结构来捆绑多至5层的衬纬衬经纱,适于玻璃纤维、芳纶纤维和碳纤维的织造加工,该织物具有极优越的冲压成型能力。在深度冲压下,织物变形均匀,不起折皱,非常适合异型曲面制件的变形成型加工。

在ACT计划的推动下,美国的许多大学,如Delaware大学、Drexel大学、North Carolina State大学、Auburn大学等都开展了对于三维纺织预成型技术的研究。美国的大西洋公司、波音公司分别耗资数千万美元制造了大型三维编织机,3TEX公司研制了多梭口三维机织设备,该设备直接为美国航天航空部门服务。与此同时,俄罗斯、德国、日本等国家也都积极开展了三维纺织技术的研究。日本Tsuzuki公司研制的一种角轮式三维编织机,携纱器由角轮传动,角轮的运动由计算机控制,具有



图1 先进的双轴向纬编织物设备

较高的编织速度,可连续织造截面为T形、I形、矩形、实体圆形及半圆型的制件。德国LIBA公司研制的多轴向缝编机可平行铺放6层或6层以上的纱线,这些纱线由缝编纱捆绑在一起,形成具有一定厚度的织物。

为了满足我国航空航天等领域研制高性能复合材料的需求,1989年天津工业大学在国内率先开展了三维纺织技术的研究工作。经过十几年的自主创新,在以下技术领域取得了突破:

- (1) 异型结构部件三维净体编织成型工艺技术及装备;
- (2) 圆型/异型2.5D机织成型工艺技术及装备;
- (3) 双/多轴向纬编工艺技术及装备;
- (4) 多维编织工艺计算机辅助设计技术;
- (5) 先进纺织复合材料虚拟设计与制造。

树脂传递模塑工艺(RTM)

RTM工艺起源于19世纪40年代的Macro法。Macro法相当简单,即对模腔抽真空以驱动浸渍过程。该工艺与手糊工艺相比,由于具有可生产双面光滑产品、树脂的注射压力适中的优点,得到了一定的发展。美国海军采用该工艺开发了大型玻璃纤维增强塑料船体。



图2 2.5D预成型体

70年代,随着对汽车结构件和高性能体育用品等的开发,RTM工艺因其成本低、可设计性强、产品尺寸精度高、表面质量好,以及低工艺

污染、环保等优点而得到广泛的应用。进入80年代,美国NASA开展了RTM技术在飞机主结构上的研发。90年代美国Lockheed Martin公司已经把RTM技术应用到F/A-22的结构件上,通过结构一体化设计,大大减少了零部件数量,降低了制造成本。因而,RTM技术作为一种低成本、高质量的复合材料成型技术在航空航天领域得到了迅速的发展。

RTM工艺的关键技术主要包括模具设计技术和RTM注胶控制技术。对于不同的零部件,RTM模具可分为单面模具和双面模具。天津工业大学开发的双面模具设计和制造技术,可保证复合材料制件的几何尺寸精度,从而实现复杂形状零部件的净尺寸制造;研制的恒压高温RTM设备采用恒定压力输送树脂,最高注射温度可达300℃,注射压力可达2MPa,可满足高性能树脂高温注胶。

三维纺织预成型技术是一种先进的纤维预成型技术,采用这种技术将纤维织造成具有一定厚度和一定形状的纤维预成型体,使RTM工艺中的纤维铺层更简化、高效,同时可保证预成型体内纤维的连续性和整体性,显著提高复合材料制件的力学性能。

三维纺织复合材料在航空航天领域的应用案例

以三维纺织预成型体为增强骨架的先进纺织复合材料是一个不分层的整体结构,具有优良的力学性能和功能性能,它使得采用复合材料制作主承力结构件和多功能制件成为可能。此外,三维纺织预成型技术还

具有卓越的异型构件仿形编织成型能力。

图2为采用三维机织技术制备的2.5D预成型体,用石英纤维制成,厚度35mm,用于陶瓷基复合材料的增强骨架。

图3为采用三维编织技术制作的截锥预成型体,制件厚度35mm,大端直径300mm,高度600mm。编织成型过程中,采用均匀截面编织技术,实现了制件横截面的变化,同时保证了制件各部位编织密度和纤维体积含量均匀,用于防热构件的增强骨架。



图3 三维编织截锥预成型体



图4 RTM成型的复合材料头盔

图4为双轴向纬编织物增强的复合材料头盔。该产品采用一层双轴向纬编织物一次变形铺敷成型,不需要裁剪,与RTM技术结合制成净尺寸的头盔,具有精度高、性能好、工艺简单、成本低等特点。

结束语

三维纺织预成型技术和RTM技术是研制和开发高性能复合材料结构件的关键技术。经过20多年的努力,天津工业大学已经形成了具有自主知识产权的核心技术,拥有了国际先进水平的技术装备,为我国航空航天等领域研制和生产了多种高性能复合材料产品,并得到了成功的推广和应用。目前,我们正在致力于低成本的三维纺织预成型技术的研究,预计将使三维纺织预成型成本降低30%。

(黄编 敬译)