

先进复合材料带缠绕、 带铺放成型技术

Molding Technology of Tape Winding and Tape Laying
for Advanced Composites

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 史耀耀 阎 龙 杨开平



史耀耀

西北工业大学机电学院教授、博士生导师。主要从事机电控制及自动化、专用数控工艺装备、高速高效数控加工、加工表面光整技术等方面的研究工作。主持和参加各类科研项目 20 余项,发表学术论文 30 余篇,获国家发明专利三项,获国家、省部级奖励 5 项,入选“2006 年度中国高等学校十大科技进展”。

先进复合材料(Advanced Composite Materials, ACM)是指高性能树脂基复合材料,即用碳纤维等高性能纤维增强的树脂基复合材料,其综合性能

先进复合材料的缠绕、铺放成型是固体火箭发动机壳体,大飞机机身、机翼,风电叶片等核心部件的关键制造技术,对我国重大项目的实施和航空航天事业的发展有着举足轻重的作用。

与铝合金相当,但比刚度、比强度要高于铝合金^[1]。随着先进复合材料的持续快速发展,其应用价值日益显著,在提高航天产品技术性能方面,复合材料的应用优势不仅体现在作为轻质化的结构材料,更体现在作为满足各种应用需求的先进功能材料,以及代表复合材料技术高层次发展的结构/功能一体化和多项功能一体化的高新技术材料。复合材料的广泛应用,在很大程度上取决于复合材料成型工艺。各种低成本制造技术应运而生,纤维缝合技术、树脂转移模塑成型技术(RTM)、树脂膜渗透成型技术(RFI)、低成本模具技术、低温低压固化技术、电子束固化技术、缠绕技术、

铺放技术等得到迅速发展和应用。其中,缠绕、铺放技术是近年来发展最快、最有效的复合材料成型制造技术。缠绕技术是指在控制张力和预定线型的条件下,将预浸胶纤维或布带连续地缠绕在相应于制品内腔尺寸的芯模或内衬上,然后在室温或加热条件下使之固化成一定形状制品



图1 自动铺带头



图2 自动纤维铺放机

的方法^[2]。铺放技术是指通过使用铺放设备按照一定规律把预浸胶纤维或布带铺放到模具表面,并用压紧辊压实^[3]。带缠绕、带铺放则专指以预浸胶布带为材料的复合材料缠绕、铺放成型技术。目前,全世界已有多种类型的缠绕、铺放设备投入项目研制和实际生产(见图1和图2)。缠绕、铺放技术在降低制造成本和提高复合材料性能方面显示出极大的优越性和潜力。

带缠绕、带铺放成型及其优势

1 带缠绕成型

带缠绕成型技术是20世纪30年代发展起来的、最早的复合材料自动化成型技术。随着材料工艺技术、装备技术和设计理论与方法的进步,带缠绕成型技术快速发展。第一台缠绕机于1947年在美国Kellog公司问世,随后缠绕生产出第一台火箭发动机壳体,直径5英寸(12.7cm),长5英尺(152.4cm)^[4]。20世纪50年代美国宇航局和空军材料研究室用缠绕工艺成功研制出“北极星A3”导弹发动机壳体,在质量减轻1/2、射程提高1倍多的情况下,成本仅为钛合金的1/10,从而奠定了缠绕成型工艺在尖端军用产品制造中的重要地位^[4]。

2 带缠绕成型的优点

带缠绕成型技术通过力学设计,

充分发挥布带拉伸强度高的特性,实现承受内/外压、弯曲、扭转、轴向载荷等情况下产品的制造。与其他成型工艺相比,带缠绕成型制品具有以下特点:

(1) 比强度高。

带缠绕成型的复合材料制品,其比强度比钢高3

倍,比钛高4倍^[2]。这是由于缠绕所采用布带的纤维束具有很高的拉伸强度,甚至高于合金钢。同时纤维束的直径很细,其表面微裂纹的尺寸和数量较小,从而减少了应力集中,使得布带具有较高的强度^[2]。

(2) 实现等强度结构。

带缠绕成型可使制品结构在不同方向的强度比最佳^[2]。也就是说,在缠绕结构的任何方向上,均可使设计制品的材料强度与该制品实际承受的强度基本一致,使制品实现等强度结构。

(3) 成本低。

带缠绕成型是各种复合材料成型方法中机械化、自动化程度较高的一种,大大提高了生产效率。而该工艺采用的原料(预浸胶布带),可批量生产,且浸胶方便,加工费用较低。因此相对降低了复合材料制品的成本。

3 带铺放成型

为解决机翼、壁板构件等大尺寸、中小曲率部件的复合材料成型,带铺放成型技术应运而生。第一台计算机控制的全自动铺带机由General Dynamics公司和Conrac公司合作完成,用于铺放F16战斗机的复合材料机翼部件^[4]。随着大型运输机、轰炸机和商用飞机复合材料用量的增加,带铺放成型技术应用越来越广泛,铺带机技术也日益完备,目

前带有双超声切割刀和缝隙光学探测器的十轴铺带机已经成为标准配置,铺带宽度最大达到300mm,生产效率达到1000kg/周,是手工铺叠的数10倍^[3]。

4 带铺放成型的优点

与其他成型工艺相比,带铺放成型技术具有很大的优势。

(1) 采用预浸胶布带和低张力,不存在稳定性的约束,带铺放成型技术可根据设计要求选择铺层方向;

(2) 按照制件的模具形状铺放布带,减少了原材料废边料,节省了原材料成本;

(3) 采用压辊装置,既可以实现任意曲面的成型,又可以保证成型压力自动可控,提高了制品质量;

(4) 铺放设备具有多自由度,不仅可以制造复杂型面的复合材料构件,而且能对铺层进行剪裁以适应局部加厚/混杂、铺层递减以及开口铺层等多方面的需要,满足各种设计要求,从而最大可能地节约了原材料,而且具有精度高、速度快、质量稳定、性能好等优点;

(5) 带铺放技术多采用功能强大的控制系统,自动化程度高,可实现复合材料构件的快速制造,迅速形成批量生产。

带缠绕、带铺放成型研究现状及应用

1 带缠绕成型技术研究现状及应用

1.1 带缠绕成型的国内外研究现状

带缠绕成型技术随着计算机技术、信息技术、控制技术的发展,在功能方面不断扩大。从国外来看,美国已将带缠绕成型工艺应用于型号研制:MD-2固体火箭发动机喷管部件中的13个零件,“侏儒”导弹的发动机喷管都是通过缠绕成型;欧洲、日本也在航天器、武器研制等领域广泛地应用带缠绕成型工艺:欧洲“阿里安”火箭的助推器喷管,法国M51导弹的壳体,日本M-3S2、H-I、H-H火

箭的助推器喷管都在使用缠绕成型的复合材料。图3所示为缠绕成型中的M51导弹壳体。

在国内,我国自60年代就开始研制复合材料缠绕设备及其成型工艺。如北京玻璃钢研究设计院、航天一院703所、航天四院43所、哈工大以及华中科技大学等单位先后研制出不同的复合材料缠绕成型设备。西工大通过自主研发的多功能布带数控缠绕机(见图4),工作效率高,缠绕出的制品达到型号工艺要求,成为能够满足高性能发动机喷管以及宇航飞行器绝热、耐烧蚀部件研制的关键配套设备。但是,上述缠绕成型设备基本上都是针对型面规则的回转体零件研制开发的,对于诸如大飞机的机翼、机身、风电叶片等大型非规则复杂结构件无法实现缠绕成型。

1.2 带缠绕成型的应用

带缠绕成型技术在风力发电机组上的应用主要是叶片、机舱和导流罩的缠绕成型^[5]。叶片作为风力

发电装置最关键、最核心的部分,其材料和制造工艺将决定风力发电机组的性能和功率,也决定风力发电机组的成本。针对复合材料风电叶片的缠绕成型,德国、丹麦、美国等风能资源利用较好的国家在大型叶片材料体系、外形设计、结构设计、工艺装备等方面作了大量的研究开发工作,并取得了丰硕的成果^[6]。据报道,现今世界上最大风力发电机的装机容量为5MW,旋转直径可达126.3m。丹麦的LM公司为此装备配套缠绕出了61.5m长的复合材料叶片,单片叶片的重量接近18t,成为世界最大的复合材料叶片“巨人”^[6]。这一实例成功地体现了材料、结构和工艺三者的完美结合。

作为可再生的清洁能源之一,我国已经开始注重风能的开发和利用。在国家科技攻关项目和863项目的共同支持下,我国已基本掌握了风力发电机组及复合材料叶片的设计和制造技术;“十五”期间,将完成MW级风力发电机组的研制,为我国风电产业参与常规能源市场竞争奠定基础。据最近的资料报道,到2020年,我国将投资2000亿元用于风力发电建设,新增风力发电能力将达3000MW,并要求风力发电装备本土化^[6]。为此,国内的一些企业和研究机构正在加紧研究开发1.5MW风力发电装备和与之配套的大型复合材料叶片。国家对可再生清洁能源的支持,为复合材料风电叶片缠绕成型技术提供了难得的发展机会。

2 带铺放成型技术研究现状及应用

2.1 带铺放成型的研究现状

欧美发达国家于20世纪70年代开始研究带铺放成型技术,并取得了很大进展,已开发出复合材料带铺放成型设备,如美国Vought飞机公司的大型CTLM铺放机,该系统有2个铺放头,可同时铺放2个不同部位,Vought公司目前正在使用此系统生产军用C-17运输机的水平安定面蒙皮。EADS-CASA是欧洲最早使用平面自动铺带机和曲面自动铺带机生产复合材料结构的公司,与手工铺贴相比,CASA自动铺带机具有很高的生产效率,一般是手工铺贴的10倍。当用150mm宽预浸胶布带作平面铺放时,生产效率是手工铺贴的22倍以上^[3]。波音公司在自动铺带技术方面投入大量资金和人力,发展自动铺带技术生产B2轰炸机大型复合材料构件。近年来,波音公司也将自动铺带技术应用于其他项目,主要包括Navy A6轰炸机(复合材料机翼)、F-22战斗机(机翼)和波音777民用飞机^[7]。波音777民用飞机的全复合材料尾翼、水平和垂直安定面蒙皮均采用自动铺带技术制造^[8]。

目前,带铺放成型技术在我国尚处于起步阶段,国内复杂的铺放制品基本上以手工铺层为主,其生产效率低、铺层质量不稳定、材料利用率低、制造周期长、费用高,难以实现复杂的结构设计要求,制约了我国航空航天制造技术的发展和水平的提高。由于复合材料带铺放成型技术对军工事业和国防事业有着重大意义,欧美发达国家对我国严密封锁,并限制高档、精密和敏感复合材料成型工艺装备对我国的出口,使我国无法走“引进、消化、吸收”的捷径。国内科研院所和企业一直致力于带铺放成型技术的研究,以打破发达国家对我国的技术垄断,促进国防、航空航天事业的发展。

2.2 带铺放成型的应用

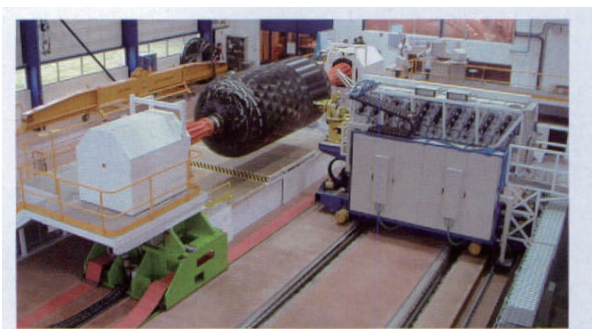


图3 缠绕成型中的M51导弹壳体

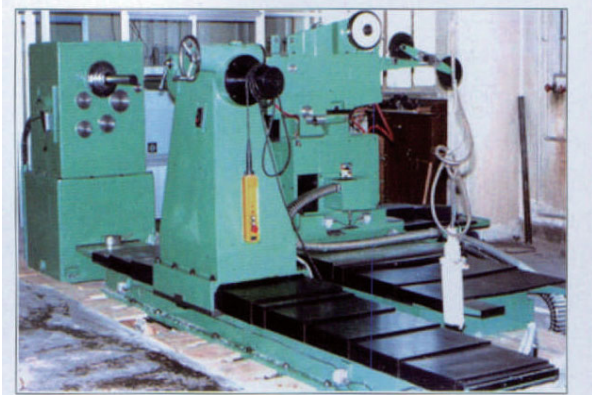


图4 西工大自主研发的多功能数控布带缠绕机

美国航空制造商大量应用带铺放成型技术生产 B1、B2 轰炸机的大型复合材料结构、F-22 战斗机机翼、波音 777 飞机机翼、水平和垂直安定面蒙皮及 C-17 运输机的水平安定面蒙皮等^[3]。欧洲生产的复合材料构件包括: A330 和 A340 水平安定面蒙皮, A340 尾翼蒙皮, A380 的安定面蒙皮和中央翼盒等^[9]。表 1 给出了各飞机生产商对带铺放成型技术的具体应用情况。

表1 带铺放成型技术在飞机结构上的应用

飞机	部件	用量	生产商
V-22	前机身	1	Boeing
V-22	中机身侧蒙皮	2	Boeing
V-22	悬翼支杆	6	Bell Helicopter
F/A-18E/F	水平尾翼蒙皮	4	Boeing
F/A-18E/F	进气道蒙皮	16	Northrop
F/A-18E/F	机身蒙皮	12	Northrop
T-45	水平尾翼蒙皮	4	Boeing
C-17	整流进气门	8	Northrop
C-17	起落架护板	4	Boeing
F-22	水平转轴	2	Alliant Teech

我国大飞机工程已经立项, 复合材料规划用量初期要达到 15%, 后期将随着材料与设计制造技术的成熟逐步扩大, 最终的上限可能接近甚至超过现有波音 787 的复合材料用量水平^[10], 带铺放成型技术是保证大飞机项目顺利实施的关键技术之一。对于现阶段复合材料用量 15% 的目标, 翼面壁板类构件将成为主导。对于 20 年研制周期的大飞机计划, 为进一步提高飞机性能, 加大复合材料用量势在必行, 复合材料机身铺放技术将成为后期的关键技术。

带缠绕、带铺放成型技术的发展趋势

随着复合材料相关技术的发展, 带缠绕、铺放成型技术呈现出多工艺复合化、成型设备精密化、CAD/CAM

技术应用日益增多、成型设备与机器人结合化、热塑性树脂基复合材料逐渐增多及新型固化技术不断应用的发展趋势。

(1) 将带缠绕成型与拉挤、铺放、编织、压缩模塑等工艺相结合, 提高带缠绕成型的工艺适应性。

由于带铺放可进行任意角度缠绕, 还可在凹形表面缠绕, 克服了缠绕工艺的不足; 若将其与带缠绕工艺结合起来, 可解决某些结构类管状构件的缠绕成型问题^[11]。缠绕-拉挤工艺加工的薄壁管改善了制品的力学性能, 已用于汽车司机驾驶室框架的制造^[12]。带缠绕与注射模塑工艺结合制造的自润滑多面滑动轴承具有卓越的摩擦学行为^[11]。

(2) 将带铺放成型与电子束固化技术结合是目前研究的热点^[3]。

电子束固化可以大幅度地降低制造时间、材料消耗和能源, 是重要的低成本制造技术。传统电子束固化采用铺叠后一次辐射固化, 要求电子束的能量高(3~10MeV), 不仅使加速器投资巨大, 并且辐射防护的投资也随之增加^[3]。意大利的 Guasti1977 年首先提出“逐层电子束固化”的思想, 完成一层铺叠后即实施电子束固化, 只需 0.5MeV 电子束能量, 并可以获得良好的力学性能^[3]。带铺放成型与电子束固化技术结合的研究逐渐进入实用阶段。

(3) 为带缠绕、带铺放成型设备配备精密张力控制系统, 以提高制品成型精度。

在缠绕、铺放成型过程中, 张力与制品的强度、致密度、疲劳性以及一致性有着密切的关系, 对制品性能影响极大。国内方面, 西工大、哈工大等均在精密张力控制系统方面进行了大量研究工作, 并取得阶段性成果; 国外方面, 法国已开发出一种用

于粗纱的张力控制系统^[11]。

(4) CAD/CAM 技术在带缠绕、带铺放成型工艺及装备中的应用日益增多。

CAD/CAM 与缠绕、铺放成型工艺的结合, 有助于缩短产品设计周期、减少废品率、提高制品的质量, 提高自动化水平及生产柔性^[13]。国内外均有一些实用化的软件问世, 但与传统 CAD/CAM 技术相比, 复合材料成型 CAD/CAM 技术的研究才刚刚起步, 研究成果有限。

(5) 将缠绕、铺放成型设备与机器人相结合, 增强成型设备的柔性及适用范围。

机器人用于带缠绕、带铺放成型, 具有自由度多、运动灵活、工艺范围宽等优点, 尤其适合小型复杂构件的缠绕、铺放成型, 如不对称构件和双凹面构件等^[11]。欧美及加拿大正在研究开发机器人缠绕机, 如比利时 Leuven 天主教大学用一台 PUMA-762 机器人与两轴数控缠绕机联接, 缠绕出多种零件^[14]; 加拿大 OTTAWA 大学也用机器人成功缠绕了 T 形管; 德国 AACHEN 工业大学建成了个复合材料柔性制造单元, 已成功生产出机床主轴、飞机机身等零件^[15]。

(6) 热固性树脂基复合材料成型向热塑性树脂基复合材料成型方向发展。

据统计, 从 1994 年以来, 热塑性复合材料是同期热固性复合材料增长的 2 倍。该高速增长可以用热塑性树脂基复合材料良好的机械性能、耐高温性能、介电常数及可循环性来解释, 尤其是它的可回收、可重复利用及不污染环境的特性适应了当今材料环保的发展方向^[16]。国外已有杜邦、帝国化学、BASF 和德国凯瑟斯路登大学等多家大公司和科研机构对热塑性树脂基复合材料的成型工艺进行了研究和生产^[15]。国内有北京航空材料研究院先进复合材料

国防科技重点实验室等少数机构对热塑性预浸带进行了缠绕试验,并对制品性能进行了初步分析。目前国内这种工艺尚处于初步开发的阶段,发展空间较大^[17]。

(7) 新型固化技术与在线固化监测技术不断出现。

红外加热、微波加热、火焰加热、电子束固化等技术可缩短固化周期,减少残余应力,提高复合材料的力学及物理性能,有利于降低成本^[11]。法国航空航天公司已对固体火箭发动机缠绕壳体的电子束固化技术进行了成功演示,其综合性能优于常规的加热固化复合材料^[18]。此外,超声技术以及光纤传感技术等均用于在线固化监测过程。前苏联在壳体缠绕成型过程中采用了磁场中缠绕及固化的工艺方法,可使制品实现更为良好的固化效果^[19]。

带缠绕、带铺放成型应用过程中存在的问题

经过 40 余年的研究与发展,我国复合材料缠绕、铺放成型制造技术的研究和应用已初具规模,形成具有航空、航天特色的复合材料技术体系,满足不同型号航空航天产品的需求,为国防、航空航天事业的发展做出了巨大贡献。复合材料垂直安定面、水平尾翼、方向舵、前机身、舱门等构件已在多种型号飞机上使用,并可小批量生产。机身、机翼、直升机旋翼等在进行了大量基础研究工作后,已装机试飞成功,航空、航天复合材料已进入实际应用阶段。尽管如此,我国复合材料的技术基础和应用水平与发达国家相比还有相当大的差距。我国目前正在大力发展载人航天、探月计划、大飞机、新型战斗机、风力发电等高新科技工程,其中火箭发动机壳体、喷管,大飞机机翼、机身,风电叶片等大型非规则结构件均需通过复合材料缠绕、铺放成型实现,这也对复合材料缠绕、铺放成型

制造技术提出了更具挑战的要求。为使复合材料缠绕、铺放成型制造技术在航空、航天及民用领域更好地推广应用,必须注意以下几个方面的问题。

(1) 国产先进复合材料无法完全满足缠绕、铺放成型制造的需求。

我国先进复合材料存在的问题为:生产规模小、质量差、价格高、应用基础研究薄弱等^[20]。深层次上表现为原材料供应的“瓶颈”效应,即国产复合材料的性能、质量、规格、价格以及供货能力等方面达不到高性能铺放成型制品的要求,无法满足国防、航空航天及民用领域对复合材料的迫切需要。国外预测我国将成为最大的复合材料制造商和用户,需求量将占世界的 1/4。基于复合材料的基础性、先导性、战略性特点,从源头解决好复合材料的供应问题,才能使我国缠绕、铺放成型制造技术的快速发展成为可能。

(2) 低成本复合材料缠绕、铺放成型制造技术。

复合材料缠绕、铺放成型普遍存在制造成本问题。在缠绕、铺放成型过程中,所用设备专一,制造工艺复杂。要使复合材料缠绕、铺放成型制造真正进入到产业化阶段,还需作更深一步的研究,发展制造过程优化及工艺控制技术,降低制造成本,拓展缠绕、铺放成型制造技术的应用领域。

(3) 复合材料缠绕、铺放成型制造技术的相关理论与方法。

通过对复合材料缠绕、铺放成型制造技术数十年的研究和成功应用,人们对其有了更深刻的认识。近年来,欧美等发达国家缠绕、铺放成型制造技术在航空、航天及民用领域的大量应用,这其中的原因是多方面的,科学合理的理论与方法是其中的重要因素之一^[1]。鉴于此,我国需要建立并不断完善缠绕、铺放成型制造技术的相关理论与方法。

(4) 复合材料缠绕、铺放成型制品的规范与标准。

将复合材料缠绕、铺放成型制品规范化、标准化,使试验和分析更好地结合起来,形成生产和评价的统一指标,可促进全行业的技术发展,显著改进制品的一致性^[20]。建立复合材料缠绕、铺放成型制品有效性能实验表征与评价体系,量化评价成型制品的可靠性和安全性,对于减少风险,降低成本有着不可忽视的作用。

(5) 重视发展规划与加大国家支持力度。

随着新一代飞行器的发展,特别是新一代卫星、大运载火箭和大飞机的发展,先进复合材料及其成型制造工艺的应用将越来越广泛。我国先进复合材料研制费用大部分要靠国家专门投入,因此应该从国家和宏观的层面上制定相应的发展规划,本着系统和长远发展的眼光,重点解决先进复合材料及其成型制造工艺中的共性和关键问题,在满足国防、航空航天领域需求的前提下促进民用领域的拓展^[1]。

结束语

先进复合材料的缠绕、铺放成型是固体火箭发动机壳体,大飞机机身、机翼,风电叶片等核心部件的关键制造技术,对我国重大项目的实施和航空航天事业的发展有着举足轻重的作用。我国将成为先进复合材料的最大用户,却面临着国外技术的严密封锁与技术储备的严重不足。为实现先进复合材料及其成型制造技术在国防、航空航天及民用领域的广泛应用,必须坚持自主研发,解决原料问题,低成本制造问题,相关理论与方法问题,规范和标准制定问题,政策支持问题。

本文共有参考文献 20 篇,因篇幅所限未能一一列出,读者如有需要请向本刊编辑部索取。(责编 岩石)