

超长复合材料应变能杆件 连续自动化成型技术及应用

Technology and Application of Continuous Automated Molding for Long Composites Strain Energy Rod

南京航空航天大学材料科学与技术学院 齐俊伟 肖 军 王跃全



齐俊伟

南京航空航天大学材料科学与技术学院高级工程师,在我国国内具有自主知识产权的自动铺带机和自动铺丝机等设备研制方面有突出贡献。目前承担包括高档数控机床与基础制造装备课题、国家民机预研重点课题等项目 3 项和省部级科研项目 5 项,获得国防科学技术一等奖 1 项,发表文章 31 篇,申报/授权国家发明专利 17 项。

采用先进复合材料制造的应变能杆依靠收拢储存的应变能可自动伸展形成可起支撑作用的超长构件,这种构件具有收拢体积小和展开刚度大的优点,便于航天器发射时携

带。特别是卫星天线和星际探测器的太阳帆尺寸要求越来越大,复合材料应变能杆因其突出优势在这些超大展开部件上有着广泛的应用前景。目前,单根应变能杆的长度已达 30 多米,未来将更长,这就对其制造技术提出更高的要求,复合材料连续自动化成型技术将成为其工程应用的重要的解决方案之一。

随着人类探索宇宙深度的增加,卫星、飞船和星际探测器等航天器的天线尺寸要求越来越大。此外,太阳帆(光帆)已被视为进行深空探测和星际探测的理想推进机构。太阳帆是以太阳的辐射压做为探测器的推进力,由于辐射压非常小,所以要求太阳帆的面积非常大,大型太阳帆的面积要求 10000 多 m^2 。航天器的天线结构和太阳帆在发射到预定轨道之前是收紧在一个较小容器中,等发

射到预定轨道后再进行展开。早期的卫星天线是采用机械机构进行展开的,结构复杂,重量较大。20 世纪 80 年代以来,美国、欧洲、日本等相继开始研究利用薄膜技术和复合材料结构来实现可收拢和展开的大型化和轻量化空间结构。

20 世纪 90 年代,欧洲航天局(ESA)和德国宇航中心(DLR)提出采用碳纤维增强复合材料应变能杆作为桅杆,对角撑开太阳帆薄膜的太阳帆总体方案,并进行了 20m × 20m 太阳帆的地面展开试验(图 1)。复合材料应变能杆是由两个 Ω 形复合材料应变能构件(图 2(a))胶接而成,可以在外力作用下压扁并收卷成特定的形状(图 2(b)),在自由状态下时依靠收卷变形储存的应变能,可展开成杆结构(图 2(c))。

近年来,随着波音 787、空客 350

等大型复合材料结构的航空器陆续投入商业运行,标志着先进复合材料结构研制日益走向大型化和经济型——从力学性能的最大化转向通过低成本技术来获得经济上可承受的结构,这一过程的转变与先进复合材料的自动化制造技术的发展是有着密切的关系。预浸料自动成型技术,包括自动铺带技术(ATL)和自动纤维铺放技术(AFP)和先进拉挤(ADP)等为核心的自动化制造技术成为发展的重要方向之一。目前发达国家在航空航天复合材料制造中广泛采用的自动化技术,采用预浸料和数字化设计与自动化制造超大、低成本先进复合材料构件,同时,促进了复合材料

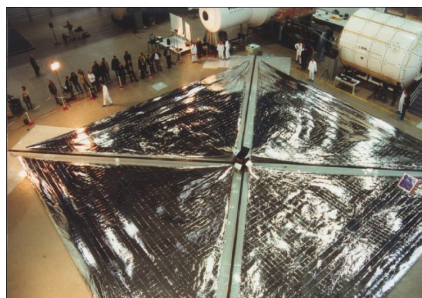
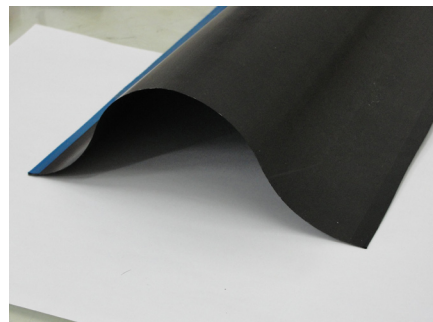
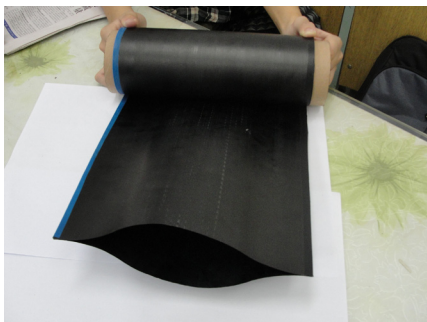


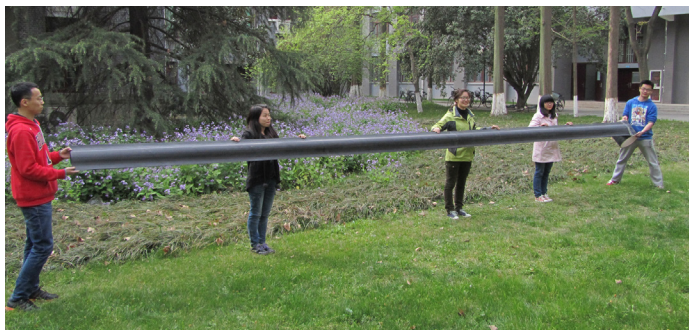
图1 太阳帆地面展开试验



(a) Ω 形复合材料应变能构件



(b) 压平收拢状态



(c) 展开后状态

图2 复合材料应变能杆

结构的产量和产品质量的提高,改善了工艺环境,实现绿色制造。

应变能杆的特点

复合材料应变能杆不同于其它复合材料型材构件,有其自身显著的特点:

(1) 超长: 应变能杆主要用于大型卫星天线和太阳帆的支撑结构,这就决定了其长度非常大的特点。ESA 和 DLR 的研究表明质量为 110kg 的飞船需要 $125\text{m} \times 125\text{m}$ 的太阳帆作为推进系统(假设太阳帆密度为 $8\text{g}/\text{m}^2$),若采用 4 根应变能杆对角支撑的方案展开,则单根应变能杆的长度接近 90m,远远超过传统的航天器和飞机的长桁等型材结构。这就要求更大成型设备或新的成型方法。

(2) 超薄: 为保障应变能杆的收拢和展开,杆壁厚度要求不超过 0.5mm; 并且为满足应变能杆的抗扭、抗弯和基频的设计要求,杆壁必须具有 $\pm \alpha^\circ$ 铺层和连续 0° 铺层(不允许间断和搭接)。这就对预浸料厚度要求更加苛刻,而且对制备预

浸料的坯材要求更高。

(3) 超高直线度: 由于应变能杆长度增加给制件的直线度带来更高的要求,从而保障两半片应变能杆制件粘接的吻合度和最终应变杆的总体直线度。

(4) 超精确外形: 由于应变能杆是由两半片胶接制成,为保障两半片胶接面的贴合紧密,胶接后没有畸变,必须要求固化后的复合材料应变能制件的外形及尺寸具有高度一致性。这就对预浸料的铺放角度和铺放张力提出了更高的要求。

复合材料超长结构连续自动化成型技术

目前,复合材料行业使用的成型设备主要包括热压罐、模压机和拉挤设备。

(1) 热压罐是具有整体加热系统的大型压力容器,具有压力场均匀、温度场均匀、加压灵活、适合多种材料及多种形状产品的生产等特点,但制件尺寸受到热压罐尺寸的限制。国外已研制的应变能构件的长度达到 30m,远远超过现今国内最大热压罐尺寸为 $\Phi 5.8\text{m} \times 19\text{m}$ 。而且随着热压罐尺寸($\geq 10\text{m}$)的增大,设备的制造成本更昂贵,温度和压力响应迟缓,温度控制精度差。因此随着复合材料应变能构件尺寸的增加,热压罐设备不能适用于超长构件的成型。

(2) 模压机具虽然具有压力范围宽(10~2000T)、压力均匀、产品尺寸精度高等特点,但其工作面尺寸有限(最大为 $1.5\text{m} \times 3\text{m}$),多用于制备板状、管状或者其他较为简单形状的复合材料制品,不能直接作为应变能构件的整体成型设备。

(3) 拉挤设备是将纤维或织物湿法浸胶,在张力作用下通过加热的模具实现连续成型和固化,该设备突破了产品尺寸的限制,能够实现连续化整体成型,但不能进行复杂铺层方式的设计,实现制品力学性能可设计

性,制品性能具有明显的方向性,其横向强度较低,含胶量控制精度较低,而且只限于生产通用复合材料型材,不能应用制备航天高性能复合材料构件。

复合材料应变能杆的显著特点对其成型工艺提出了更高的要求。国外已研制的应变能构件的长度已达到 30m,采用现有工艺,其超长且无搭接的要求,远远超出了目前国内

复合材料成型和固化设备的制造能力。另外,传统的手工铺叠已远远不能满足应变能杆超高直线度和超精密外形对预浸料铺放角度、张力和直线度的工艺要求,必须采用自动化连续铺叠裁剪。

为了解决超长复合材料应变能杆整体成型的关键技术,满足应变能杆的设计要求,南京航空航天大学提出了复合材料构件连续成型技术方

案,其基本流程如图 3 所示。它是以预浸料为原料,经裁剪-铺叠、预变形、热压固化、后固化、牵引和检测等工艺过程替代原有成型设备成型产品,直接制造复合材料结构件的总称。高质量预浸料作为原材料可保证制件的厚度均匀,丝束分布均匀;自动化裁剪和铺叠可保证预浸料的铺放角度和铺放张力,保障制件的直线度;预变形可避免制件在热压模具中的变形过大,从而保障制件固化后的精确外形;固定位置或移动的热压固化模具和后固化设备可避免超大热压罐的使用,降低制造成本;制件牵引系统可实现复合材料构件的连续成型。

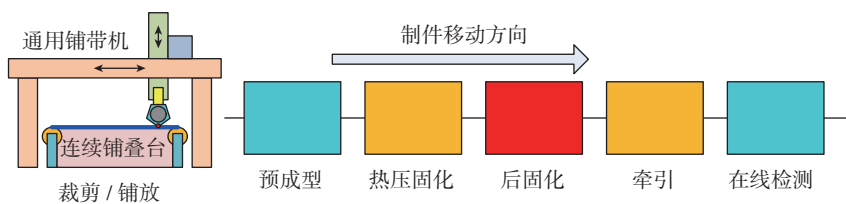


图3 自动铺放—连续成型流程示意图

表1 复合材料构件连续成型设备与传统设备比较

项目	连续成型	拉挤成型	热压罐	模压
产品长度	无限长	无限长	≤ 10m	≤ 2m
精度	高	一般	高	高
厚度	≥ 0.2mm	≥ 0.5mm	≥ 0.2mm	≥ 0.5mm
产品力学性能	可设计	不可设计	可设计	可设计
孔隙率 /%	≤ 1	≤ 3	≤ 1	≤ 1
生产效率	20mm/min	20mm/min	产品 /6h ≤	产品 /6h ≤
纤维体积含量 /%	≥ 60	≤ 60	≥ 60	≥ 60
模具尺寸	≤ 产品尺寸	≤ 产品尺寸	≥ 产品尺寸	≥ 产品尺寸

复合材料连续成型设备与传统成型设备的比较见表 1。连续成型设备不受场地和模具的限制,可在小型模具上通过连续固化成型生产大型、超长复合材料构件。另外,该设备可通过成型前的自动裁剪-铺叠系统,实现具有铺层设计的复合材料构件的连续生产,这与传统的拉挤设备不同,同时可控制复合材料构件的纤维体积含量。

南京航空航天大学在复合材料构件连续成型技术方案的基础上初步研制了复合材料应变能杆成型的原理样机(图 4 (a)),并试制了 20m 长应变能杆(图 4 (b))。

应用前景

复合材料应变能杆因其突出优势在航天领域具有广泛的应用前景,可以用于合成孔径雷达(SAR)卫星的天线的桅杆,以及其他卫星和探测器天线的展开机构。

复合材料构件整体连续成型技术不仅可以完成应变能杆的制造,而且可以用于制造卫星和飞船中的桁条,以及飞机的地板梁和机身机翼的长桁等复合材料型材结构。从而提高生产效率,降低成本,保证产品质量的稳定性。(责编 亦非)



(a) 原理样机



(b) 样品

图4 复合材料应变能杆制造的原理样机及样品