

高性能热塑性复合材料 在大型客机结构件上的应用*

Applications of High Performance Thermoplastic Composites for Commercial Airplane Structural Component

上海飞机制造有限公司航空制造研究所 张 婷



张 婷

博士,毕业于清华大学材料科学与工程学院。目前在上海飞机制造有限公司标准规范中心工作,任高级研发工程师,研究方向为复合材料工艺性能研究,复合材料结构件的制造、热塑性复合材料结构件的制造等。

先进复合材料已经成为大型客机的首选结构材料,其用量占机体重量的百分比更是成为衡量民机先进性的一项重要指标^[1-2]。目前,波音公司最先进的飞机波音 787 上复合材料用量占结构总重量的 50%;而

高性能热塑性复合材料在大型客机上逐渐替代金属材料或热固性复合材料已经成为新材料新技术发展的一个方向,各发达国家及航空机构均加大了该方面的研究。

空客公司 A350 飞机上的复合材料用量也由原先的 37% 增加到现在的 53%。尽管两大飞机制造公司对复合材料在飞机结构减重方面取得的效果表示满意,但仍对选择金属还是复合材料存在强烈抗争,对复材在飞机上用量的进一步扩大持谨慎的态度,原因是目前飞机结构上广泛使用的复合材料主要是热固性树脂基复合材料,其材料制造成本较高,且制造过程使用的预浸料/热压罐技术也非常昂贵。另外,在日益强调环保的今天,热固性复合材料的环境友好性差及废弃物难以回收处理等不足,也制约其在飞机上的应用扩展^[2-4]。

高性能热塑性复合材料是指用高强玻璃纤维、芳纶纤维和碳纤维增强耐高温热塑性树脂的复合材料。与热固性复合材料相比,高性能热塑性复合材料具有较好的耐热性能和刚度、强度;其线状链的分子结构使得聚合物保持着良好的韧性,因此材

料还具有较高的韧性、优良的抗蠕变能力、优秀的损伤容限性能以及良好的抗冲击性能^[5-6];同时,由于热塑性聚合物分子链不含有产生链间化学反应的基团,其在加热过程仅仅发生加热变软和冷却变硬的物理变化,故成型周期短、生产效率高^[7],具有较大降低制造和使用成本的潜力;其结构件还可以直接熔融焊接,无需铆结,也能有效减轻飞机重量,并利于维修^[8]。另外,某些热塑性复合材料的长期使用温度可达 250℃ 以上,并且耐水性极优,可在湿热环境下长期使用^[7];同时预浸料无存放环境与时间限制,可长期贮存、并且废料还可以回收再利用,通常被称为“绿色材料”^[9-10]。正是基于上述优点,高性能热塑性复合材料被认为是一种有发展前途的飞机结构用材料,一直受到航空航天领域的广泛关注^[11-12]。

自 20 世纪 60 年代以来,高性能连续纤维增强热塑性复合材料就受

* 上海市科技人才计划项目(13QB1401200)及国家 863 项目(2013AA040104)资助。

到欧、美、日等发达国家的重视,并取得许多突破性进展。部分产品已被波音、空客、福特等公司成功应用到飞机蒙皮、整流罩、升降舵、平尾等制件上,但使用范围非常有限^[13-16]。长期以来,制约热塑性复合材料在民机上应用的主要原因有以下两个:(1)预浸料制造困难,材料成本高;(2)制件制造需要高温高压,对设备和辅料要求高。但鉴于这种材料的低成本潜力,从20世纪80年代开始,以美国为主导的西方国家进行了一系列旨在提高热塑性复合材料预浸料的制造水平、降低制件制造成本的研究计划,并最终取得大量的研究成果,为高性能热塑性复合材料在民机上的应用推广奠定了基础。本文将就高性能热塑性复合材料在国外飞机结构件上的应用现状及最新研究成果和未来发展作简要介绍。

航空用热塑性树脂基复合材料的研究进展

目前,应用到航空领域的热塑性树脂主要是耐高温、高性能的树脂基体:聚醚醚酮(PEEK)、聚苯硫醚(PPS)、聚醚酰亚胺(PEI)。其中,无定形的PEI由于具有更低的加工温度及加工成本,比半结晶的PPS及高成型温度的PEEK在飞机结构件上的应用更多。表1列出了部分已经商品化的热塑性复合材料材料牌号以及在现有机型结构件上的使用情况^[17-23]。

热塑性复合材料不仅与树脂、增强纤维的性能,还与纤维的增强方式、材料的成型工艺以及成型设备有关。目前,原材料的研究主要集中在研发并认证合适的材料,即为适应不同工艺方案而进行的新树脂体系材料的研发和材料形式的变更。其中热塑性片(板)材非常类似热固性复合材料,不仅可以简化模塑操作,而且可在自动化生产线上大量生产,是目前飞机上最为常见的材料形式。

但随着自动铺放等低成本制造技术发展,飞机结构制造商往往需要根据构件的结构特点、制造难度以及成本等,要求材料供应商提供不同形式的材料以满足不同的成型要求。例如,Royal Ten Cate公司的Cetex产品也可以被加工成预浸束纱、混合纱等形式,以适应不同的工艺要求。

国外通过几十年的预先研究和试验验证,原材料的制造技术已经相当成熟,许多商品化的产品已在波音、空客等大型客机上服役多年,效果非常好。国内原材料的生产在经过近30年的发展,也积累了相当多的经验,一些制约该种材料应用的瓶颈问题也逐步得到解决,部分产品甚至已经达到商品化的水平并实现产业化,材料稳定化生产是目前实现我国原材料在飞机上大量应用的关键

问题。

高性能热塑性复合材料的成型技术

热塑性树脂基复合材料加工工艺大致可分为:热塑性基体浸渍工艺和制件成型工艺。其中最关键的技术是成型技术,它是制约热塑性复合材料在飞机上广泛应用的主要瓶颈。下面将重点介绍热塑性复合材料飞机结构件制造中已经成熟使用和正在研究发展的成型技术。

1 热压成型^[24-26]

热压成型是热塑性复合材料在航空制件成型中主要的方法之一,按照所用的设备不同又可以分为模压成型、双膜成型、热压罐成型和真空袋成型。其基本工艺过程是先将预浸料裁剪铺叠后,放入模具中升温加

表1 热塑性复合材料在现有机型上的应用^[17-21]

树脂材料	商标名	材料供应商	使用部位
聚醚醚酮 PEEK	APC-2	Cytec	F-22 主起落架舱门
			波音 787 吊顶部件
			A400M 油箱口盖
聚苯硫醚 PPS	Cetex PPS	Royal Ten Cate	A330 副翼肋、方向舵前缘部件
			A330-200 方向舵前缘肋
			A340 副翼肋、龙骨梁肋、机翼前缘
			A340-500/600 及 A380: 副翼肋、方向舵前缘部件、翼内检修盖板、龙骨梁连接角片、龙骨梁肋、发动机吊架面板、机翼固定前缘组件及前缘盖板
			A400M 副翼翼肋、除冰面板、油箱口盖
			G650 方向舵及升降舵
			Fokker50 方向舵前缘翼肋、主起落架翼肋和桁条
			A400M 副翼翼肋、除冰面板
聚醚酰亚胺 PEI	Cetex PEI	Royal Ten Cate	G650 方向舵及升降舵机翼后缘、肋
			G450、G650、G550 方向舵肋、后缘、压力舱壁板
			Dornier 328 襟翼肋、防冰面板
			Gulfstream V 地板、压力面板、方向舵肋及机翼后缘
			Gulfstream IV 方向舵肋及机翼后缘
			Fokker 50 及 100 地板
			A320 货舱地板夹层结构面板
A330-340 机翼整流罩			

热,待升温至成型温度后,通过不同的加压设备对预浸料铺层进行加压,赋形得到最终满足要求的制件。热压成型是工业界普遍看好,并重点研究发展的低成本、规模化制造技术,并广泛应用于飞机制件的制造中。同时,对于一些变厚度、形状复杂的梁、长桁等制件(图1),热压可以实现其快速成型,通常从下料到完成固化只需要15min。目前制约热压成型工艺的主要问题是飞机上可用的高性能热塑性树脂通常具有较高的熔融粘性,而高粘性使得树脂对增强纤维的浸润性和穿透性差、邻近层之间的粘接困难、较难排除层板中的孔隙、以及成型过程中树脂均匀流动很困难等问题。

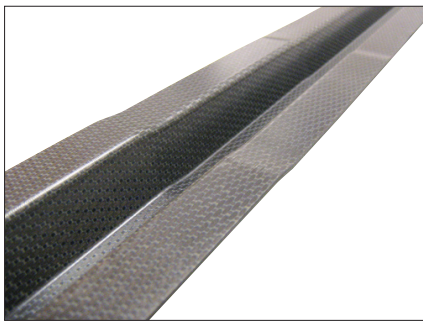


图1 热塑性树脂基复合材料热压变厚长桁^[26]

2 缠绕成型^[27-29]

在诸多热塑性复合材料成型方法中,缠绕成型能较好地实现低成本和高效率。一般而言,热塑性树脂纤维缠绕既可先将热塑性预浸带干法缠绕成型,然后在固化炉或热压罐内固化;又可用原位固化工艺成型,即将连续的经加热炉预热后的预浸带缠绕在相应的芯模上,在缠绕的同时用热源使树脂熔融,使预浸料逐层粘合成一体并最终形成热塑性复合材料制件。在原位固化工艺中不需要加热、加压等“后定型”(固化)环节,可以大幅度提高制品的生产效率,从而大大降低生产成本,是目前热塑性复合材料缠绕成型重点发展的工艺技术,比较适合圆形截面制件的制造(图2)。缠绕成型工艺优点

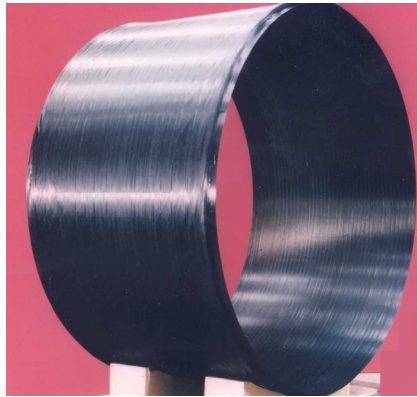


图2 热塑性树脂基复合材料缠绕制品^[29]

是可以按照制品的受力状况设计缠绕规律,从而充分发挥纤维的增强作用;并且制品质量稳定,容易实现自动化生产。存在问题是在缠绕过程中需要采用合适的浸渍方法,在缠绕的过程中必须进行合理的加热以及匹配的缠绕速度,以防止树脂在缠绕过程中冷却凝固,导致层内和层间粘结不良,严重影响制品性能。总体来说热塑性纤维缠绕工艺已发展到了一定阶段,一些产品也已用于航空航天和民用。如美国用CF/PEEK缠绕制作了飞机水平安定面。

3 自动铺放成型^[30-33]

自动铺放技术是将复合材料的剪裁、定位、铺叠、压实等步骤集于一体,且具有控温和质量检测功能的复合材料的集成化数控成型技术,能有效满足自动化、高产量、高质量、低成本等技术要求,是热塑性复合材料低成本制造技术的一个重点研究方向。目前国外热塑性复合材料的自动铺放技术的研究主要包括工艺、装备以及软件控制技术,而我国在热塑性树脂基复合材料自动铺放方面的研究尚未起步。

在航空领域中,自动铺带适用于尺寸较大,曲率相对较小的零件,如整体壁板类零件、大梁、长桁等,而纤维自动铺放适用于尺寸较大,形状相对较复杂的零件,如机身段、进气道等。经过20多年的研究,国外热塑性复合材料自动铺带技术

已经趋于成熟。2009年荷兰航空专家鲍肯研制了1个10mm条宽的 $2\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ 三维纤维铺放设备单元,并利用该设备在阳模上成功铺放了一新型前缘的蒙皮;而NASA支持的热塑性复合材料的自动铺放原位固化头安装在辛辛那提的自动铺带机上成功铺放了1个 $2\text{m} \times 1.2\text{m}$ 、表面焊接有6根工字型梁的AS4/PEEK蒙皮。随着铺放技术的发展,面临的挑战是如何保证质量的同时提高效率以及实现大规模的产业化。

4 纤维混杂法^[34-36]

纤维混杂法是热塑复合材料加工技术的一次革新,技术关键是制备与增强纤维直径相当的树脂纤维,然后使两种纤维混杂成一种复合纱,再编织成预浸料,或直接用两种纤维进行编织。考虑到航空领域中主流热熔预浸料存在硬度过高不易铺放,不适合成型复杂曲面和精致结构,纤维混杂法得到的具有良好的柔软性和垂悬性的预浸料或预制体变形能力强,铺覆性好,对于变曲率、变厚度的复杂结构的成型还是非常具有优势的,故是一种很有前途的成型方法。纤维混杂法的优点是树脂含量易于控制,纤维能得到充分浸润,可以直接缠绕成型得到制件;同时,由于热塑纤维和增强纤维紧密结合在一起,减小了树脂渗透的距离,也能有效克服热塑树脂浸渍的困难;并且因为材料具有良好的柔韧性,可以编织三维近实物形状,因此可以大大提高材料的韧性及损伤容限,同时缩短制件的制作周期。但由于制取直径极细的热塑性树脂纤维($<10\mu\text{m}$)非常困难,同时编织过程中易造成纤维损伤,限制了这一技术的应用发展。

高性能热塑性复合材料在大型客机上的应用与发展前景

1 高性能热塑性复合材料在大型客机上的应用状况^[26,37-40]

国外热塑性复合材料在商用飞

机上的应用研究开始于 20 世纪 90 年代初,并且一开始即涉猎到主结构件上的应用。一个典型例子就是 C/PEI 成功应用在 Gulfstream G550 飞机的压力舱壁板和 Fokker70、Fokker100 飞机的货舱地板。但由于早期材料、成型设备以及工艺的局限性,主要还是集中在一些小而简单的结构件上,如飞机上常用的梁、肋结构。随着新材料、新工艺以及设计理念的发展,高性能热塑性复合材料的应用逐渐从小结构件发展到次承力结构件上,典型案例是 A380 飞机上的多肋设计理念以及由焊接技术连接的 C/PPS 薄蒙皮多肋 J-nose 固定翼前缘结构。

高性能热塑性复合材料在大型客机上逐渐替代金属材料或热固性复合材料已经成为新材料新技术发展的一个方向,各发达国家及航空机构均加大了该方面的研究。尽管近期高性能热塑性复合材料在复杂结构的制造上还存在一些技术难点并缺少经济、快速、可靠地零件制造工艺,暂时不大可能大量取代热固性复合材料,但随着先进材料和自动化设备的发展,成型工艺技术的进步,以及焊接等装配技术的成熟,其极有可能在未来飞机上作为主要材料应用在包括机身在内的主承力结构件上。

2 高性能热塑性复合材料在空客客机上的应用研究^[41-45]

空中客车公司一直是新材料新工艺在商用客机上使用的领跑者和倡导者,其在 20 世纪 90 年代初就开始参与到热塑性树脂基复合材料在大型客机上的应用研究,并成功地将 PPS 树脂基热塑性复合材料应用在一些结构简单、尺寸较小的肋、梁等小件上。随着材料性能、成型工艺、以及装配技术的提高,高性能热塑性复合材料已被逐渐使用到空客飞机的次承力结构件上,例如: A340/500、A380 机翼 J-nose 固定前缘。而在 2009 年,空客公司联合 Fokker 公司、

Tencate 公司、德尔福特理工大学和图恩特大学等启动了一项为期 4 年的 TAPAS 飞机热塑性主结构件项目,该项目目标是为未来飞机项目建立一项制造大型主结构件所必需的热塑性复合材料技术。作为该项目的一项重要组成部分是研制 C-PEEK 热塑性复合材料机身,目前该全尺寸 4m 长,双曲率演示产品的研发已取得突破性进展,一旦成功,该结构可能在未来新型 A30X 机型上使用。

3 高性能热塑性复合材料在国产大飞机上的应用展望

计划于 2014 年首飞的国产大飞机复合材料用量将达到 15.9%,鉴于材料、工艺以及适航取证等问题,目前结构件上选用的复合材料还是在波音和空客机型上服役多年、非常成熟的环氧树脂基热固性复合材料,高性能热塑性复合材料的应用几乎为零。但实际上现阶段环氧树脂基复合材料结构件的成本仍然比同代的金属结构要高,即使采用自动化的制造技术,其成本下降的空间也非常有限。近年来国外低成本制造技术的创新工作主要集中在寻找可替代材料和低成本成型技术,高性能热塑性复合材料的经济、有效使用是未来飞机结构用材料的一个重要选择,也是先进材料发展和成型技术进步的必然结果。鉴于国外在该方面的应用研究也起步不久,各项关键技术均待突破,各国技术差距并不明显,我国应尽快开展和加强该方面的开发应用工作,缩短与国外在先进飞机上先进材料和制造技术上的差距。

聚醚醚酮(PEEK)、聚苯硫醚(PPS)及聚醚酰亚胺(PEI)等树脂基复合材料目前已经被波音、空客认证,并用于部分飞机结构上,取得了较好的减重和降低成本的效果。因此,我国国产大飞机可以考虑先参照国外的成功案例,在一些需要大量使用的梁、肋结构上使用热塑性复合材料,充分发挥快速成型、批量生产的

低成本、高效率优势;同时,在一些需要抗冲击(如前缘),或耐高温的部位(如发动机面板)也可以使用热塑性复合材料,充分发挥热塑性树脂较高的韧性、优秀的损伤容限性能和抗耐热性等特征。由于国外热塑性复合材料结构件的制造技术对我国实行严格的技术封锁,而一体化热成型批量生产热塑性复合材料零件是未来的一个重要发展趋势,其设备研制相对容易,制造工艺相对简单,我国可以考虑从该项技术的研发开始,积累经验,并逐渐赶上国外先进制造水平,争取在将来使用我国自主研发的自动化成型设备,如自动铺带、铺丝、缠绕、拉挤设备等。

另外,材料国产化也是避免将来国外对我国进行技术封锁的有效途径,国产热塑性复合材料的制备技术储备与支撑可以以大型客机项目为契机,通过大客的研制平台,使材料与大飞机项目同步发展。同时针对性的开展相关研究工作,积累经验,建立技术数据库以便将来材料的适航认证和扩大应用,使我国自主研发的大型客机将来可以通过新材料新工艺的使用达到飞机减重、成本降低、绿色环保、造福人类。

参考文献

- [1] 杜善义. 先进复合材料和航空航天. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
- [2] 张兴金, 邓忠林. 浅谈纤维复合材料与中国大飞机. 纤维复合材料, 2009, 6(2): 24-26.
- [3] 黄汉生. 复合材料在飞机主结构中的应用动向. 化工新型材料, 2004, 32(10): 51-52.
- [4] 陈绍杰, 申屠年. 先进复合材料的近期发展趋势. 高科技纤维与应用, 2004, 29(1): 1-7.
- [5] Peter M. High performance thermoplastic. Plastics Engineering, 2007, 6: 18-22.

本文共有参考文献 45 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 良辰)