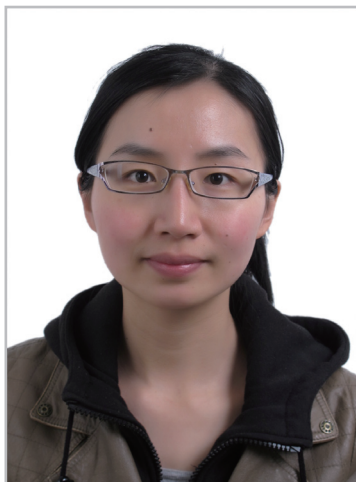


树脂传递模塑技术研究进展 及在航空领域的应用

Development and Application of Resin Transfer Molding in Aviation

中航复合材料有限责任公司 马金瑞 黄峰 赵龙 刘强 卓鹏



马金瑞

硕士,工程师,主要从事复合材料液体成型技术研究及型号攻关工作。负责和参与了近10项预研及型号攻关课题。

树脂传递模塑(Resin Transfer Molding, RTM)技术属于复合材料液体成型(Liquid Composite Molding)技术的范畴。RTM工艺起源于20世纪40年代末^[1],由于具有产品质量好、生产效率高、制造成本低,易于生产整体复合材料构件等突出特点得到了迅速发展。

RTM技术的工艺过程:首先,在膜腔中铺放好与制件结构形式一致

RTM工艺经过几十年的发展,技术日趋成熟,已成功应用于飞机机体、发动机等结构的制造,并已成为高性能航空器制造的关键技术之一。在可以预知的未来,RTM工艺随着技术的不断革新,会朝着更加高速、高效、自动化并注重低能耗和环境保护的趋势发展,应用的范围也将进一步扩大。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.14.056

的增强材料预成型体;然后,在一定的温度、压力下,采用注射设备将低黏度的液态树脂注入闭合膜腔中,树脂在浸渍预成型体的同时,置换出膜腔中的全部气体;在模具充满膜腔后,通过加热使树脂固化,然后脱模获得产品。

目前,RTM工艺已经广泛应用于航空航天、建筑、通讯、交通、卫生、体育器材等领域^[2-7]。尤其在航空领域,RTM工艺凭借高减重和低成本优势,在先进飞机的承力和非承力结构中得到了广泛的应用。

RTM技术的特点

RTM工艺与其他成型工艺相

比,具有以下优点。

(1) 生产效率高。

制造过程可实现机械化或自动化;能成型从小型精密到大型整体复杂的多种复合材料制件;对于带有夹芯、加筋和预埋件的大型、复杂构件,可通过一步浸渍、固化成型,代替传统成型工艺2步或多步成型的过程。

(2) 产品质量高。

制件的表面质量高;制件的尺寸精度高,且公差精确可控,稳定性和重复性好;制件的纤维体积分含量高,约为55%~60%;空隙率低,约为0~0.5%;预成型体的设计自由度大,既可采用全部或局部(缝合、

Z-Pin 等)增强以及(热塑性树脂等)增韧技术,又可采用整体性比较强的三维织物,制件的抗分层损伤容限高。

(3)经济效果好。

RTM 工艺是一种“非热压罐”低成本制造工艺,所采用的预成型体和部分树脂体系可以室温储存,可实现复合材料制件的净尺寸和近净尺寸的制造,降低了废料和机械加工成本;可一步浸渍带有夹芯、加筋和预埋件的大型、整体复杂构件,代替部分或全部装配,能节省装配工时和成本,批量越大,成本越低。

(4)环境友好。

闭模工艺,有利于人体健康和环境保护。

同时,RTM 工艺存在以下局限性:(1)复杂型腔的模具设计和制造困难。(2)对大尺寸、结构复杂制件的树脂充模动态监控还比较困难。(3)模具成本占工艺成本比重大,小规模生产成本优势受限。

RTM 技术的发展

经过多年的发展,RTM 技术为进一步提高生产效率、降低生产成本,在上述成型基本过程的基础上又衍生出一些新的 RTM 技术,包括液体压力成型 LPM (Liquid Pressure Molding)技术、多个插入式衬模 RTM (MIT-RTM)、高压 RTM (HP-RTM)、压缩 RTM (Compression RTM)、热膨胀 RTM (TERTM)、柔性 RTM (FRTM)、共注射 RTM (CIRTM)、反应注射成型(RIM)、溶剂辅助 RTM 工艺(SARTM)、树脂注射循环 RTM (RIRTM)以及零注射压力 RTM (ZIP RTM)。

1 LPM 技术

LPM 技术是中航复合材料有限责任公司于 2012 年开发的一种新的液态成型技术。原理是在刚性模具型腔内铺放按性能和结构要求设计好的 LPM 工艺专用预定型体,然后

采用压力设备将专用树脂注入闭合模腔内预定型体四周的树脂快速流胶通道中,并通过调节出胶通道上施加压力装置的压力,对复合材料制件施加固化需要的压力,最后按照树脂的工艺规范进行升温固化的一种新型复合材料成型技术。

LPM 技术作为一种新型、高效的复合材料液体成型工艺技术,具有成型精度高、成型的复合材料纤维体含量与预浸料/热压罐成型水平相当、工艺适用性强、成型效率高、树脂要求低、成型设备简单和制造成本低等优点。

2 MIT-RTM 技术

MIT-RTM 技术是英国 PlastechTT 公司 20 世纪 90 年代末针对传统 RTM 技术成型效率低的缺点,而开发的一种高效 RTM 工艺技术。

MIT-RTM 装置由多个插入式衬模 MIT (Multiple Insert Tooling)和衬模模腔支撑、定位、密封和加热系统组成。多个插入式衬模,即零件成型面,是由一个尺寸精度高、尺寸稳定好,且可重复使用的母模分离出来的多个轻质薄壳(约 4~7mm),这些衬模可以在模腔外独立进行喷胶衣、铺放增强材料的操作,节约了注射、固化时占用成型模具的工艺等待时间,有效提高了生产效率。

MIT-RTM 技术优点包括:(1)传统 RTM 工艺大部分工序发生在模腔内部,MIT-RTM 技术可将发生在模腔内部的工序进行分解,部分移出模腔外来完成,大幅度地减少了工艺等待时间,成型效率高;(2)衬模成本占整个设备成本比重小,大批量生产成本优势明显;(3)衬模损坏后,修补替换容易,生产过程基本不受影响。

3 HP-RTM 技术

HP-RTM 是近年来针对低成本模具推出的一种大批量生产高性能热固性复合材料零件的新型 RTM 工

艺技术。采用高温固化树脂体系,在充模完成后,树脂快速固化,达到较高的固化度。避免了由低成本模具生产出来的产品尺寸精度不高等问题。

HP-RTM 技术的原理是在刚性模具型腔内铺放按性能和结构要求设计好的预成型体,然后在真空辅助排气的情况下,利用注射设备提供的高压将专用树脂注入闭合模腔内,最后利用液压机提供的高压完成树脂的浸渍和固化。

HP-RTM 工艺技术优点主要包括:

(1)树脂充模时间短;

(2)可使用快速固化树脂体系,固化周期短;

(3)高压注射和固化,有利于空气的排除,产品孔隙率低;

(4)产品表面质量高,尺寸精度高;

(5)具有较高的工艺稳定性和重复性。

4 压缩 RTM 技术

压缩 RTM 技术是针对传统 RTM 成形技术成型高纤维体含量的复合材料制品时,预成型体的渗透率小,注射树脂时需要较大的压力,成型效率低等缺点而开发的一种新的液态成型技术。

压缩 RTM 技术的原理是在刚性模具型腔内铺放按性能和结构要求设计好的预成型体,模具部分闭合,树脂体系在低的注射压力下注入到模腔内,对模具加压使其完全闭合到最终位置,同时树脂完成对预成型体的充分浸润,最后按照树脂的工艺规范进行升温固化的一种新型复合材料液体成型技术。

压缩 RTM 技术优点主要包括:

(1)树脂沿预成型体厚度方向流动浸润,充模时间短;(2)可成型高纤维体含量(63%)的复合材料制品;

(3)产品的孔隙率较传统 RTM 制品小;(4)具有高的工艺稳定性和重复

性。

5 SARTM 技术

针对高温 RTM 技术所采用的聚酰亚胺树脂体系自身的工艺特性——缩聚反应、前期有大量挥发分、熔点高、粘度大等缺点,在采用高温树脂体系注射时,主要是采用溶剂型的聚酰亚胺树脂,即在工艺过程中室温下通过低粘度($<200\text{mPa}\cdot\text{s}$)的含溶剂树脂溶液进行渗透,操作期可以无限长,避免了高温注射带来的设备要求高、操作期短等问题,但存在的主要问题是需要在固化前将溶剂和缩聚副产物排出,工艺过程相对较复杂,会导致制件含胶量、厚度等难以控制,容易出现局部孔隙。

目前国外采用用于热压罐工艺的 PMR-15、PMR-II、AFR700B 等聚酰亚胺树脂体系,结合三维编织技术和 SARTM 工艺成功地制造了一些结构复杂的复合材料构件,例如发动机进气道、燃料和润滑油外部管线、可调定子叶片轴套等构件以及波纹板、扩散叶片等。

6 结构反应型 RTM (SRIM)

该工艺首先把长纤维增强垫预置在模具型腔中,再利用高压计量泵提供的高压冲击力,将两种单体物料在混合头混合均匀,于一定温度条件下,将混合好的树脂体系注射到模具内,固化成型复合材料制品。

结构反应型 RTM 工艺优点主要包括:(1)树脂充模时间短;(2)成型周期短。

RTM 工艺设备

RTM 工艺设备主要包括模具、注射设备和固化设备 3 个部分,且各部分均会对整个研制生产过程具有决定性影响。

RTM 成型工艺属于一种闭模操作工艺,成型中的树脂流动过程、压力和热传递过程及固化过程均发生在模具内部,成型模具的质量会直接“复制”在构件上,因此模具选材和

设计是获得高质量、高精度、良好表面质量制件的前提。一般来说,RTM 成型工艺所选用模具材料应具备导热快、比热容低、热稳定性好、热膨胀系数小、加工工艺性好、质量轻、使用寿命长、成本低、使用和维护方便等优点。对于大批量或表面质量要求高的 RTM 制件,一般选用钢、锌铝合金或镀镍钢壳模。不同的成型方法对模具结构形式有不同的要求。与传统的热压罐成型工艺相比,RTM 成型工艺所用模具除要满足刚度和传热要求外,还对上、下模具的配合精度、模具表面质量、注射口和溢料口的设计,模具密封以及制件脱模装置等要求较高。成功的 RTM 成型模具应具有以下特点:结构精巧、温度场均匀、系统密封性好,合模、脱模等操作简单易行,所成型制件的内部质量和外形尺寸精度满足技术条件要求等。

对于传统的 RTM 工艺来说,通常采用注射设备进行树脂的注射,该设备一般包括树脂储料罐,树脂供给系统(恒压注射和恒流注射)、树脂输送管路、计量泵以及各种自动化仪表。注射设备按混合方式可分为单组分式、双组分式(加压式和泵式)和加催化剂泵式 3 种。

产品的生产效率取决于成型设备的自动化程度,为提高注射效率,尽可能地节约树脂的用量,实现对产品的质量,世界各国厂商不断研究出新型注射设备。瑞典 Aplicator 公司研制了一系列注射设备,如 RI-2、RI-15 和 IPR2-8000 系列,这些设备使用简单,操作方便,可高效安全地将树脂和催化剂的混合物注射到模具中。美国 GRACO 公司研发的 Spartan 注射设备以其稳定的低压特性、完整可靠的循环系统、完美的混和效果和可靠的清洗装置,得到了国内外使用厂家的好评。法国 ISOJET 公司研发了专业双组分、单组分以及适用于聚酰亚胺树脂的特

殊 RTM 注射设备,该公司的设备也已经在国内外 RTM 技术的研发中发挥作用。

相对于注射,树脂的固化可以在不同的设备,比如一般在烘箱、压机、整体加热模具中进行。选择加热方式时,要综合考虑各加热方式的加热效率,加热系统温度均匀性,升、降温速率的可控范围,以及温度的控制精度、运行成本 and 环境保护等因素。对于烘箱加热来说,还要考虑烘箱的尺寸和内、外轨道的承载能力能够满足制件的需求。

随着 RTM 技术的发展,国外越来越多的航空企业采用具有加热系统的 RTM 成型平台替代传统的大功率烘箱+注射设备的 RTM 工艺设备。RTM 成型平台系统主要由预定型模具/模架、RTM 模具/模架、加热单元、液压系统、控制系统和 RTM 注射系统等部件构成,该平台系统可同时实现模具加压/加热、树脂注射和固化等 RTM 成型工序,不但能简化操作过程,提高生产效率、降低能耗、缩短制造周期,而且能降低 RTM 成型模具的设计刚度和制造成本,并可显著提高零件的成型质量。为打破进口设备垄断国内市场的局面,国内上海百若试验仪器有限公司研制了国内第 1 台 RTM 一体化成型设备,该系统按照 RTM 工艺将反应釜、真空设备、注射排气系统、加热系统、保压系统、模具等多种设备有机融合起来。上、下模单独移动、翻转、合模、合模翻转均采用自动化处理,整个过程动作连续,定位准备。模具加热、保压、注射均采用人机控制,操作简单。该套设备符合 RTM 成型工艺的要求,满足复合材料生产企业 RTM 生产自动化的要求。

近期,法国 Pinette Emidecau 公司为航空制造开发了一个完整的自动化高速 RTM 工作单元,该工作单元有机器人预成型装模;闭模并传送;树脂转移模塑(RTM)注射;注射

后热炉固化等4个工作站。其中预成型体转运、装模、闭模、工作站间的传送等工序采用机器人或其他自动化设施处理,同时热炉可以装下多个模具。该工作单元提升了工艺连贯性,提高了生产效率,并已通过制造碳纤维/环氧树脂航空零件得到验证。

RTM 技术在航空领域的应用现状

航空复合材料的发展方向是高性能、低成本和整体化,而 RTM 成型技术作为一种适用于整体成型的低成本复合材料制造方法,在航空领域得到了广泛的应用,部分应用实现了连续化批量生产。

随着工艺水平的提高和完善,RTM 技术在航空领域从开始仅用于非承力构件,如襟翼导轨整流罩和发动机后吊架整流罩,到用于次承力部位,如舱门等,目前已被成功地应用于主承力构件上,如飞机螺旋桨叶片等。

1 飞机机体结构

在军用航空领域,采用了更高效、整体化更强的先进复合材料结构,在提高强度的同时,实现了材料和结构的双减重,满足了新一代作战飞机的高性能要求。F-22 是 RTM 工艺在主承力结构中应用的显著实例,在美国洛克希德·马丁公司生产的 F-22 原型机项目中,有 400 多个零件用该技术制造,典型的是机翼正弦波纹梁、武器舱帽形、加筋、水平和垂直尾翼、前机身油箱框、前机身隔框以及机翼的上、下梁和后梁。其中包括由转包商 Dow-UT 公司生产的 RTM 成型的机翼正弦波纹梁,长约 4.5m,尺寸精度高,制造成本低,零件数量减少 50%。在 F-35 飞机的研制中,更将 RTM 技术作为一种主要的整体化高精度成型技术,其采用 Co-RTM 技术研制的多腔结构整体复合材料垂尾的零件数由 13 个减

少至 1 个,紧固件减少上千件。在提高整体化程度的同时,极大地降低了成本。

在民用航空领域,RTM 技术也得到了广泛的应用,如空客 A330/340 宽体客机的垂尾翼盒连接耳片和水平尾翼的悬臂梁,以及采用编织 RTM 成型的萨伯(SAAB)340 和 Fokker50 涡轮螺旋桨飞机的螺旋桨叶片,此外,还有被称为“真正的湾流”的 G250 飞机采用 RTM 技术成型的一体化方向舵(长 2.8m,宽 1.1m,厚 25.4mm)。该部件由美国俄亥俄州的北海岸复合材料公司(North Coast Composites)生产制造,是一个集翼肋、翼梁、方向舵外壳及防雷击装置为一体的整体化结构。95% 的零部件都具有净尺寸成型特性,仅有 3 种外壳边缘需要后加工。波音公司在最新型的 787 飞机的研制中也采用了 RTM 成型技术,最具代表性的是其全复合材料起落架支臂。这是 RTM 技术在主承力结构上的应用证明。

直升机领域也广泛采用了 RTM 成型技术,如欧洲的 NH90 直升机,其起落架扭力臂和纵向推力杆这 2 种构件均使用 RTM 工艺成型。此外,美国科曼奇直升机接头采用了 RTM 成型,美国 V.SYSTEM 公司采用 RTM 技术成型了直升机异形整流外壳。

2 发动机结构

除了航空飞行器结构,RTM 技术凭借低成本、高效率及可实现轻量化设计的优点,在发动机行业中也获得了较多的应用。

虽然发动机的核心部件对复合材料来说通常温度过高,但是冷端部件则是复合材料最主要的潜在应用领域,如大涵道比发动机上的帽罩前锥、转子叶片、风扇机匣及包容环、风扇出口导流叶片、风扇静子叶片、发动机短舱及反推装置、消音结构等部件^[8-10]。其中最具有代表性的为 F-135

发动机进气机匣、Genx 发动机风扇机匣、LEAP-X 发动机风扇叶片和风扇机匣,以及 PW 4000、V2500、RB21-Trent/A330 等发动机的反推装置,其中 RB21-Trent/A330 等发动机反推装置的 RTM 复合材料件相对于铝合金件减重 36% 以上。

结论

RTM 工艺经过几十年的发展,技术日趋成熟,已成功应用于飞机机体、发动机等结构的制造,并已成为高性能航空器制造的关键技术之一。在可以预知的未来,RTM 工艺随着技术的不断革新,会朝着更加高速、高效、自动化并注重低能耗和环境保护的趋势发展,应用的范围也将进一步扩大。

参考文献

- [1] 高国强. 复合材料 LCM 整体成型工艺发展及应用. 玻璃钢/复合材料,2014(9):105-108.
- [2] 梅启林,冀运东,陈小成,等. 复合材料液体模塑成型工艺与装备进展. 玻璃钢/复合材料,2014(9):52-61.
- [3] 张彦飞,刘亚青,杜瑞奎,等. 复合材料液体模塑成型技术(LCM)的研究进展. 塑料,2005,34(2):31-35.
- [4] McCarthy R F J. Polymer composite applications to aerospace equipment. Composite Manufacturing,1994,5(2):83-93.
- [5] 陈绍杰. 复合材料技术与大型飞机. 航空学报,2008,29(3):605-610.
- [6] 郭玉明,冯志海,王金明. 高性能 PAN 基碳纤维及其复合材料在航天领域的应用. 高科技纤维与应用,2007,32(5):1-7.
- [7] 高克强,李新华,薛忠民,等. RTM 在汽车工业中的应用现状与发展前景. 工程塑料应用,2000,28(9):32-36.
- [8] 刘强,赵龙,黄峰. 商用大涵道比发动机复合材料风扇叶片应用现状与展望. 航空制造技术,2014(15):58-62.
- [9] Rochester M. Snecma NH and partner AEC create resin transfer engine blade process. Aviation Week and Space Technology,2012,9:74-77.
- [10] Chris R. Aviation outlook: Composites in commercial aircraft jet engines. High Performance Composite,2008(9):63-94.

(责编 亿霖)