

液态成型复合材料在直升机上的应用

赵秀芬^{1,2}, 刘刚^{1,2}, 李伟东^{1,2}

(1. 中航复合材料有限责任公司, 北京 101300;

2. 航空工业复合材料技术中心, 北京 101300)

[摘要] 自20世纪60年代以来,高性能树脂基复合材料在直升机结构中的应用获得了迅速发展,传统的预浸料-热压罐成型复合材料在直升机结构上已取得大量应用,对结构减重、性能提升起到了显著作用。但是,随着复合材料技术的发展以及直升机对低成本、整体成型技术的强烈需求,低成本液态成型复合材料逐渐在直升机上获得应用,其应用水平及应用效果也不断提升。以RTM、VARI两种典型的液态成型技术为主综述了液态成型复合材料在直升机上的应用,并对新型的液态成型工艺进行了介绍,以期能为直升机设计人员和复合材料工艺人员提供选材及工艺方案方面的技术支持。

关键词: 直升机; 复合材料; 液态成型; 树脂传递模塑(RTM); 真空辅助树脂浸渗(VARI)

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2017.17.060



赵秀芬

硕士、工程师,从事航空先进复合材料技术及项目管理研究。

自20世纪60年代复合材料开始在直升机上应用以来,20世纪80年代西科斯基(Sikorsky)S-75、贝尔D292、波音360、欧直BK-117等全复合材料机身的直升机相继试飞。21世纪以来,空客H-160低噪声全复合材料直升机和Sikorsky S-97全复合材料高速直升机也相继问世。复合材料具有重量轻、强度高、耐化学腐蚀、可设计性强、寿命长、不需

润滑、使用维护方便、可靠性高等特点,使直升机的重量效率有了大幅度提高,成为直升机设计者的首选材料,但是直升机应用的广泛性及其巨大的民用市场决定了直升机的成本成为必须考量的因素,预浸料-热压罐成型复合材料的高成本限制了其在直升机上的扩大应用和发展,液态成型等低成本复合材料技术应运而生。液态成型技术相较于传统的预浸料-热压罐成型方法来说,不需要考虑预浸料的储存运输和热压罐的投入等高成本因素,复合材料结构更加灵活、内部质量更易控制、制件变形控制及尺寸精度较高、固化时间及工艺成本明显降低,是继传统的预浸料-热压罐成型工艺之后,航空复合材料高性能、低成本制造技术发展的主流技术之一,在直升机领域具有广阔的应用前景。

复合材料液态成型技术

复合材料液态成型技术(Liquid Composite Molding, LCM)是指将液态树脂注入铺有纤维预成型体的闭合模腔中,或加热熔化预先放入模腔内的树脂膜,液态树脂在流动充满模

腔的同时完成纤维/树脂的浸润并经固化脱模后成为复合材料制品的一种复合材料成型技术^[1-5]。LCM工艺是由树脂传递模塑工艺发展起来的系列低成本复合材料成型工艺,主要包括树脂传递模塑(Resin Transfer Molding, RTM)、真空辅助树脂浸渗(Vacuum Assisted Resin Infusion, VARI)、树脂膜浸渗成型(Resin Film Infusion, RFI)、反应注射成型(Reaction Injection Molding, RIM)等,同等质量树脂传递模塑成型(Same Qualified Resin Transfer Molding, SQRTM)、高压树脂传递模塑成型(High Pressure RTM, HPRTM)等新型液态成型技术也逐渐发展并获得应用。

在先进结构复合材料中使用最广泛的是RTM、VARI和RFI成型工艺,而在直升机复合材料结构中采用的有RTM、VARI和SQRTM成型工艺,本部分重点对RTM和VARI成型工艺的原理、优缺点及适用对象进行介绍,并对SQRTM成型工艺进行介绍。

1 RTM成型工艺

RTM成型工艺^[1-6]的基本原理

是在闭合模具型腔中预先放置经合理设计、剪裁或经机械化预成型的预制体,将低黏度树脂注入闭合模具中,通过树脂的流动充分浸渍放置在模具中的干纤维预制体,经固化、脱模后加工得到复合材料产品,如图1所示。

RTM成型工艺是一种非常具有竞争力的低成本、整体化复合材料成型技术,可以作为预浸料-热压罐成型工艺的补充或替代技术,热压罐成型工艺的最大缺点是其体积大、结构复杂,且是压力容器,因此建设投资成本较高;同时对于较大体积的热压罐,其升温 and 加压的速度比较慢,场内温度场控制不均匀^[5]。

与热压罐成型工艺相比,RTM成型工艺具有以下优点:

(1)RTM成型工艺中,纤维增强体是以预制体的形式使用的,预制体可以是单向/双向机织布、短切毡、非屈曲织物(NCF)、三维针织物、二维/三维编织物等,还可以根据性能要求进行择向增强、局部增强、混杂增强以及采用预埋和夹芯结构等,充分发挥复合材料的可设计性;

(2)RTM成型制件的成本基本取决于选用的树脂体系和预制体,原材料的价格很大程度上决定了零件的价格,因此采用RTM成型工艺成为降低复合材料成本的合理选择;

(3)RTM成型制件和成型模具可大量采用CAD设计,投产前的准备时间短,生产效率高,并可充分利用数值模拟分析工具完善设计;

(4)通过预先制造近净尺寸的纤维预制体,并在闭合模具中注射成型,可进行复杂结构整体化制造,并且极大地减少了二次修整和装配等后加工的需要^[4]。

RTM成型工艺存在的难点是在成型阶段树脂和纤维通过浸渍过程实现赋形,纤维在模腔中的流动、纤维浸渍过程以及树脂的固化过程都对最终产品的性能有很大的影响,因而导致了工艺复杂性增大,工艺控制难度较大。主要问题有:

(1)树脂对纤维的浸渍不够理想,制品里存在孔隙率较高、干纤维的现象;

(2)制品的纤维含量较低;

(3)大面积、结构复杂的模具型腔内,模塑过程中树脂流动不均,较难对树脂的真实流动浸润行为进行预测和控制^[5]。

RTM成型工艺适用于具有复杂外形的大型整体化结构和大厚度承力结构。

2 VARI成型工艺

VARI成型工艺是在RTM成型工艺的基础上发展起来的一种低成本大型复合材料制件的成型技术,将柔性真空袋包覆在单面刚性模具上,密封预成型体,在真空负压状态下排除预成型体中的气体,通过树脂的流动、渗透,实现对纤维及织物增强体的浸渍,并在非热压罐条件下固化成型^[7-10]。

VARI成型工艺的优点:用VARI成型工艺制造复合材料构件

时,采用柔性的真空袋代替了金属上模,降低了模具成本;采用了树脂导流槽或高渗透率介质作为树脂的流动,因此树脂的流程更短,对增强纤维的浸渍更快,提高了浸润效率;采用真空辅助成型,降低了制造成本;采用纤维预成型体,充分发挥复合材料的可设计性^[7-10]。

VARI成型工艺的缺点:VARI的主要问题是很难成型纤维体含量高的复合材料构件,且制件的厚度尺寸很难保证。

VARI成型工艺适用于大尺寸、大厚度蒙皮、壁板类制件的低成本、高效率制造,尤其是单面尺寸精度要求高的制件。

3 SQRTM成型工艺

SQRTM成型工艺是一种设计用来制备热压罐级别质量制件却不使用热压罐的工艺技术,由Radius Engineering公司发展并商业化的一种融合了RTM成型工艺和预浸料工艺的用来生产净尺寸、高度整体化复合材料制件的闭膜工艺。SQRTM成型工艺和标准RTM成型工艺的不同之处在于它用预浸料铺层代替了干态纤维预成型体。利用自动铺带技术完成预浸料预制结构的铺覆,预制结构进行热定型处理后装模,再将少量的RTM树脂在压力辅助下注入闭合模具内,从而提供预浸料固化所需要的固化压力,整个过程可采用自动化制造^[11-14]。

SQRTM成型工艺与传统的热压罐成型工艺相比具有以下优势:

(1)复合材料层合板的内部质量更容易控制,这主要是由于在SQRTM成型工艺中,提供预浸料压实固化的液态压力可由注射机精确控制,压力稳定性更好,同时通过注射机输出的液态压力可实现大范围调节,有效抑制预浸料树脂中挥发物及水蒸气的挥发,从而抑制孔隙的形成;

(2)由于SQRTM成型工艺中采

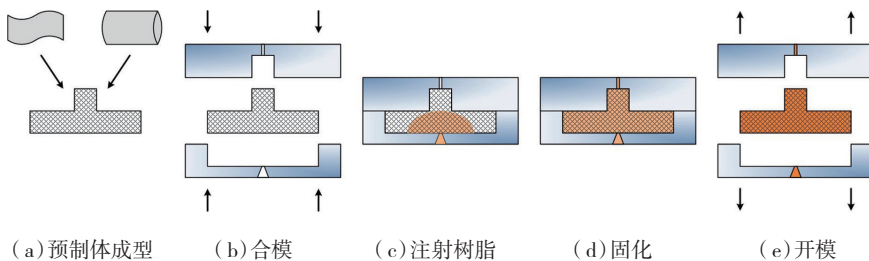


图1 RTM成型过程示意图

Fig.1 RTM molding process diagram

用了双面的闭合模具,因此,制件的变形控制及尺寸精度较热压罐成型工艺高;

(3) 由于 SQRTM 成型工艺中使用的压机和模具的热导率较高,这使得复合材料在固化时可以实现更快的升温 and 冷却,因此,相比热压罐成型, SQRTM 成型的固化时间成本明显降低^[11-14]。

SQRTM 相比传统 RTM 成型工艺有诸多方面的优势。以完全浸渍的预浸料为原材料,可以避免 RTM 注射过程中干斑的产生,无需在液态树脂中加入增韧剂来提高复合材料的韧性。不仅如此,由于该工艺和标准热压罐成型工艺步骤极其相似,均使用已评价合格的原材料,可以减少顾客的使用风险,提高该成型工艺的普适性^[11-14]。

SQRTM 成型工艺的缺点: 模具成本较高,同时复合材料制件可设计性不能得到充分发挥。

液态成型复合材料在直升机上的应用

随着复合材料在直升机上的应用和发展,液态成型等低成本复合材料制造技术也得到了巨大的发展。RTM、VARI 和 RFI 等液态成型工艺制备的复合材料结构在直升机领域获得了广泛的应用,例如机身、尾梁、桨叶、起落架、舱门及整流罩等均有采用液态成型技术的典型应用。

1 RTM 成型复合材料在直升机上的应用

美国波音 AH-64D“长弓阿帕奇”武装直升机(Boeing AH-64D Apache Helicopter Gunships)是现美国陆军主力武装直升机,发展自美国陆军 20 世纪 70 年代的先进武装直升机(Advanced Attack Helicopter, AAH)计划。通过使用复合材料达到结构减重约 28%,制造工时减少约 42%,工程设计成本减少约 41%。这其中,通过 RTM 成型工艺等实现整体化制

造,大量降低成本,图 2 为 AH-64D 直升机及 RTM 成型中机身结构。

美国波音 RAH-66“科曼奇”(Comanche)武装直升机的机体结构采用了纵向 3 大模块式结构,机上复合材料重量占全机结构重量约为 51%。在机体结构中使用复合材料的有蒙皮、舱门、桁条、隔框、中央龙骨梁、炮塔整流罩、风扇尾浆护罩、垂尾及水平安定面;在旋翼系统中使用复合材料的有柔性梁、桨叶、自动倾斜器、扭力管、扭力臂等;在传动系统中使用复合材料的有传动轴、主减速器箱等^[15-16]。柔性梁采用 S2 玻璃纤维和 IM7 碳纤维混杂和 3M 公司的 PR500 树脂,采用 RTM 成型工艺;自动倾斜器采用 IM7 碳纤维和 3M 公司的 PR500 树脂,采用 RTM 成型;地板梁和接头也采用了 RTM

成型工艺,具体如图 3 所示。

欧洲 NH-90 直升机是由英国、法国、德国、意大利和荷兰等 5 国于 1984 年起共同研制的中型(8~9t)多用途直升机,具有全复合材料机身结构,与全金属结构相比,其零件数目减少约 20%,复合材料机身使空机重量降低约 15%,同时增加了机身的刚性和耐腐蚀性,提高了损伤容限,减小了雷达和红外特征信号,提高了抗坠毁性^[17-18]。NH-90 直升机舱门、龙骨梁、起落架扭力臂(Torque)和纵向推力杆(Trailing arm)均采用 RTM 成型工艺制造(图 4)。上下两节扭力臂约 175mm,重量为 0.12~0.13kg。纵向推力杆为 900mm 长,总重为 22kg,该部分的复合材料质量为 13kg。

美国贝尔 V-22“鱼鹰”(Osprey)倾转旋翼机是由美国国防部“三军



图2 RTM成型AH-64D直升机中机身结构

Fig.2 RTM molding AH-64D helicopter fuselage structure

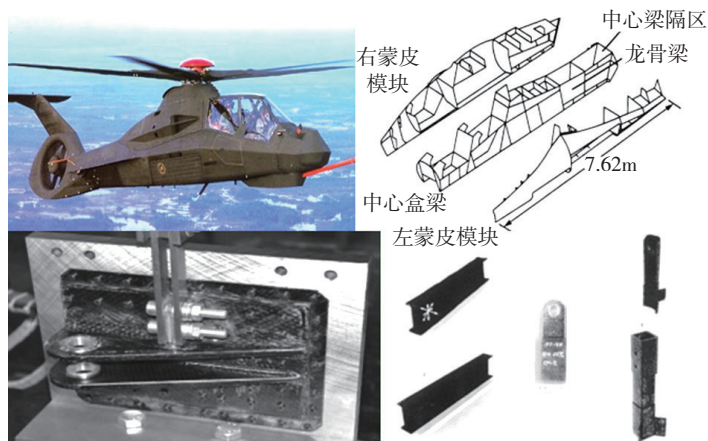


图3 RTM成型RAH-66直升机地板梁和接头

Fig.3 RTM molding RAH-66 helicopter floor beams and connectors

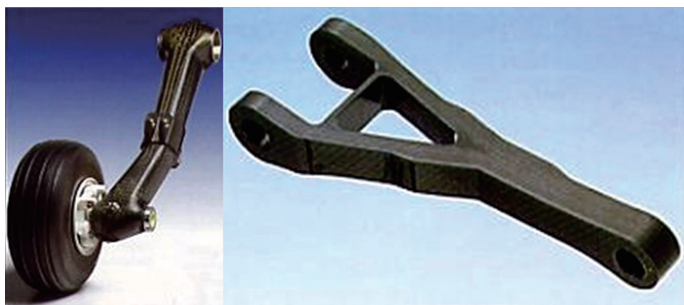


图4 RTM成型NH-90直升机起落架扭力臂和纵向推力杆
Fig.4 RTM molding NH-90 helicopter torque link and trailing arm

联合先进垂直起落飞机”(JVX)提出来的,1983年,美国海军与贝尔直升机公司签订了初步设计合同。机体约41%是复合材料的,机翼采用的是IM-6石墨/环氧树脂,机身和尾翼采用的AS4复合材料,发动机短舱整流罩和塔柱支撑采用玻璃纤维增强复合材料^[17],其中尾传动轴、尾斜轴采用RTM成型。

此外,RTM成型工艺还在直升机起落架舱、机身典型结构件、主桨毂等直升机机身部件上获得应用。

2 VARI成型复合材料在直升机上的应用

VARI成型技术是非常适宜大型复合材料构件成型的低成本制造技术,如翼面、壁板类结构,与热压罐成型工艺相似。21世纪初,美国波音公司和美军共同启动了降低“阿帕奇”直升机机身重量及制造劳动成本的项目。由Seemann公司负责设计工装并用VARI成型工艺一体成型了“阿帕奇”机舱,如图5所示。该机身为全碳纤维复合材料多筋和多墙壁板结构,并运用了纤维缝合的技术增强其层间性能。

美国CH-46“海骑士”(Sea Knight)运输直升机采用VARI技术成型发动机整流罩,如图6所示。此外,美国CH-47“支奴干”运输直升机前发动机吊架和整流罩采用了VARI技术整体成型。

3 SQRTM成型复合材料在直升机上的应用

SQRTM成型工艺已经成功地



图5 VARI成型的阿帕奇直升机机舱
Fig.5 VARI molding Apache helicopter cabin



图6 VARI成型的CH-46直升机发动机整流罩
Fig.6 VARI molding CH-46 helicopter engine fairing

应用于全球鹰无人机(UAV)的加长翼尖,并在SARAP(Survivable Affordable Repairable Airframe Program)项目的支持下制造了直升机起落架舱和一个整体式西科斯基UH-60“黑鹰”(Black Hawk)直升



图7 SQRTM成型的复合材料起落架舱
Fig.7 SQRTM molding composite gear compartment

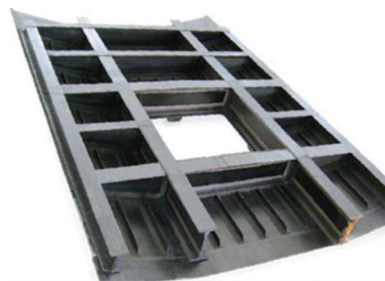


图8 SQRTM成型黑鹰直升机机身典型结构件
Fig.8 SQRTM molding UH-60 helicopter fuselage typical structures

机机身典型结构件^[11-14],如图7、8所示。

结束语

针对直升机复合材料结构,不同的液体成型工艺均有其独特的适用性和一定的局限性,成型工艺的选择应充分考虑制件的结构特点和性能要求,选择合适的成型工艺才能充分发挥其制造优势,例如:对于复合材料起落架支臂类、异形梁肋及螺旋桨类结构等主承力构件建议采用RTM成型技术;复合材料整流罩、机身蒙

皮类等结构复杂的次承力构件建议采用 VARI 成型技术。而且液态成型工艺的应用范围及应用水平仍然有较大的进步空间,随着液态成型技术的发展,例如高韧性液态成型复合材料、耐高温液态成型复合材料、复合编织-RTM、HPRTM、SQRTM、缝合/RFI 等新材料和新工艺的出现和发展,必将进一步推动液态成型技术在直升机上的应用。

参考文献

- [1] 邢丽英. 先进树脂基复合材料自动化制造技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014.
- XING Liying. Automated manufacturing technology of advanced polymer composite materials[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014.
- [2] 益小苏, 杜善义, 张立同. 复合材料手册[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2009.
- YI Xiaosu, DU Shanyi, ZHANG Litong. Handbook of composites[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2009.
- [3] 陈祥宝. 聚合物基复合材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- CHEN Xiangbao. Handbook of polymer matrix composites[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [4] 潘利剑. 先进复合材料成型工艺图解[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- PAN Lijian. Advanced composite molding process diagram[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016
- [5] KRUCKENBERG T, PATON R. Resin transfer moulding for aerospace structures[M]. Springer Netherlands, 1998,46: 148-176.
- [6] 徐竹. 复合材料液体成型工艺发展及应用[J]. 合成材料老化与应用, 2016, 45(2): 83-86.
- XU Zhu. The development and application of the LCM process[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2016, 45(2): 83-86.
- [7] 李培旭, 陈萍, 苏佳智, 等. 复合材料先进液体成型技术的航空应用与最近进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(8): 99-104.
- LI Peixu, CHEN Ping, SU Jiachi, et al. The recent development of advanced liquid composite molding technology and its application aviation[J]. FRP/CM, 2016(8): 99-104.
- [8] 赵渠森, 赵攀峰. 真空辅助成型技术(一)[J]. 高科技纤维与应用, 2002, 27(3): 22-27.
- ZHAO Qusen, ZHAO Panfeng. Vacuum assisted resin infusion(1)[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2002, 27(3): 22-27.
- [9] 赵渠森, 赵攀峰. 真空辅助成型技术(二)[J]. 高科技纤维与应用, 2002, 27(4): 21-26.
- ZHAO Qusen, ZHAO Panfeng. Vacuum assisted resin infusion(2)[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2002, 27(4): 21-26.
- [10] 赵渠森, 赵攀峰. 真空辅助成型技术(三)[J]. 高科技纤维与应用, 2002, 27(5): 25-27.
- ZHAO Qusen, ZHAO Panfeng. Vacuum assisted resin infusion(3)[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2002, 27(5): 25-27.
- [11] BLACK S. SQRTM enables net-shape parts[EB/OL]. 2016-08-31. <http://www.compositesworld.com/articles/sqrtm-enables-net-shape-parts>.
- [12] VRIES H P J. Development of generic composite box structures with prepreg preforms and RTM[J]. Journal of the Midwest Modern Language Association, 2002, 19(2): 3-12.
- [13] ROOVER C D. Highly integrated structure manufactured in one-shot with prepreg UD tape[J]. JEC Composites Magazine, 2011, 48(62): 40-42.
- [14] 尚波. SQRTM 制造净成型件[J]. 玻璃钢, 2014(3): 37-40.
- SHANG Bo. SQRTM manufacturing net shape[J]. FRP/CM, 2014(3): 37-40.
- [15] 京京. 复合材料在“科曼奇”直升机上的应用[J]. 国际航空, 1994(7): 21-22.
- JING Jing. Use of composite in comanche helicopter[J]. International aviation, 1994(7): 21-22.
- [16] FALLON Jr W P, GARBO S P. Material usage and selection on the RAH-66 Comanche[C]//The 40th International SAMPE Symposium and Exhibition, California, 1995.
- [17] 倪先平. 直升机手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.
- Ni Xianping. Helicopter manual[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003.
- [18] NITSCHKE R H, MULLER R. The system approach to crash worthiness for the NH90[C]//51th American Helicopter Society international Annual Forum 1995. Texas, 1995.

通讯作者: 赵秀芬, E-mail:xfzhao53@126.com。

Application of Liquid Molding Composites in Helicopter

ZHAO Xiufen^{1,2}, LIU Gang^{1,2}, LI Weidong^{1,2}

(1. AVIC Composite Corporation Ltd., Beijing 101300, China;

2. AVIC Composites Center, Beijing 101300, China)

[ABSTRACT] Since the 1960s, the application of composites on helicopter structure has obtained rapid development. The traditional prepreg-autoclave molding composites on the structure of helicopter has made a large number of applications, but with the development of composite technology and helicopters, the demand of low-cost technology and the overall molding technology, the low cost liquid molding composite is gradually applied in helicopters. Based on RTM and VARI two kinds of liquid forming technology, the application of liquid composites molding on the helicopter is reviewed in this paper, to help helicopter design and composite material technology personnel.

Keywords: Helicopter; Composite; Liquid composite molding; Resin transfer molding (RTM); Vacuum assisted resin infusion (VARI)

(责编 大漠)