

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.02.013

编织结构复合材料 RTM 成型流场仿真模拟

孙煜^{1,2}, 刘强¹, 黄峰¹, 马金瑞¹, 张宇¹

(1. 中国航空工业集团公司基础技术研究院, 北京 101300; 2. 中航复合材料有限责任公司, 北京 101300)

摘要: 针对航空发动机用编织结构复合材料树脂传递模塑料(RTM)成型工艺,开展了增韧树脂基体的工艺特性及编织结构预制体的渗透特性研究,并结合 PAM-RTM 软件对 RTM 成型工艺方案进行了研究,研究表明,1304 增韧环氧树脂 RTM 成型的工艺窗口期仅有 25 min,8 步法编织结构经向渗透率远大于纬向和 Z 向渗透率。通过 PAM-RTM 软件对 RTM 成型树脂注射流道和工艺参数进行设计,获得了航空发动机用高韧性编织结构复合材料 RTM 成型工艺方法。

关键词: 树脂传递模塑料成型; 编织结构; 渗透率; 增韧树脂; 仿真

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)02-0066-05

Simulation of Woven Structure Composite in RTM Molding Process

Sun Yu^{1,2}, Liu Qiang¹, Huang Feng¹, Ma Jinrui¹, Zhang Yu¹

(1. AVIC Composite Technology Center, Beijing 101300, China; 2. AVIC Composite Corporation Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract: The resin transfer moulding (RTM) molding process of aerospace engine woven structural composites was carried out, and the process characteristics of the toughened resin matrix and the permeability characteristics of the woven structure preform were studied, and the RTM molding process was studied in combination with PAM-RTM software. The results show that, the process window of 1304 toughened epoxy resin RTM molding is only 25 minutes. The inter-permeability of the 8-step weaving structure is much larger than the inter- and inter-Z permeability. The RTM molding resin injection flow path and process parameters are designed by PAM-RTM software, and the RTM molding process of high toughness woven structural composite material for aeroengine is obtained.

Keywords: resin transfer moulding molding process; woven structure; permeability; toughened resin; simulation

随着复合材料在各行各业的广泛应用,材料的耐久性设计和损伤容限设计越来越引起人们的重视^[1]。传统层合结构复合材料层间强度弱、韧性低、受冲击后易分层,显著降低了复合材料结构的损伤容限和设计许用值,致使复合材料减重优势在结构设计中难以得到充分发挥。编织结构复合材料是由经纬纱在空间相互交织在一起形成的整体结构,具有厚度方向和横向方向的全方位增强,能够大幅度提高复合材料的抗层间剪切强度、耐冲击性能和损伤容限^[2],可以很好地满足目前航空航天,特别是航空发动机领域对先进复合材料低质量高性能的要求。早在 1988 年,美国航天局(NASA)和美国军方就先

后提出了先进复合材料研究计划以及先进的轻型飞机机身结构程序(ALAFS)计划。确定将树脂传递模塑料(RTM)编织技术作为改善复合材料层间性能,提高损伤容限和耐冲击性的主要技术途径^[3]。

发动机长期在振动、冷热态循环变化等严苛环境下服役,对其复合材料制件有较高的成型质量要求,而 RTM 成型工艺的稳定性是复合材料制件成型质量控制的关键技术。由于发动机对复合材料风扇叶片包容机匣有较高的抗冲击要求,因此,国外采用了具有高韧性特征的专用液体成型树脂结合编织结构预制体进行成型,如国外 CYTEC 公司的 PR520N 树脂、HEXCEL 公司的 RTM230ST 树

通讯作者: 孙煜, 硕士, 主要从事树脂基复合材料液体成型工艺研究 E-mail: whutsunyu@163.com

收稿日期: 2019-11-15

引用格式: 孙煜, 刘强, 黄峰, 等. 编织结构复合材料 RTM 成型流场仿真模拟[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(2): 66-70.

Sun Yu, Liu Qiang, Huang Feng, et al. Simulation of woven structure composite in RTM molding process[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(2): 66-70.

脂、3M 公司的 2895 树脂。该类树脂的特点是韧性好、抗冲击指标优异,但工艺操作性远不及常规的液体成型树脂,其主要的工艺难点在于高温注射(温度 $\geq 150^{\circ}\text{C}$)、超短时效($\leq 35\text{ min}$)和快速变化的粘温特性(30 min 内黏度由 $100\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 快速升高至 $1000\sim 1500\text{ Pa}\cdot\text{s}$),工艺窗口狭窄,工艺参数可调节范围小,工艺调节裕度小,对 RTM 工艺的稳定性研究的难度较大,国外在经过多年的 RTM 工艺稳定性的研究的基础上已经实现了高韧液体成型树脂的大规模应用,如 LEAP-X 发动机的三维机织叶片、三维机织包容机匣均采用 PR520N 树脂和专利性的 RTM 技术成型^[4],而国内近年来刚刚开始液体成型用高韧树脂的研发,在航空复合材料领域仅开展高温短时效 RTM 成型工艺的基础性研究,高温短时效 RTM 成型工艺的稳定性尚未达到满足工程化生产的程度,对复杂结构的三维机织风扇叶片预制体和大尺寸的包容机匣预制体的 RTM 稳定成型是巨大的工艺挑战。因此,尚需开展大量的基础研究和工艺验证。

针对高韧性树脂 RTM 成型编织结构复合材料工艺参数控制这一难题,笔者研究了高韧性短时效 RTM 树脂工艺特性及编织结构预制体的渗透特性,并结合 PAM-RTM 软件进行 RTM 成型树脂注射方案工艺仿真。优选树脂注射流道和成型工艺参数,使之能够与高韧性短时效 RTM 树脂工艺窗口期相匹配,寻求航空发动机用高韧性编织结构复合材料 RTM 成型工艺方法。

1 实验部分

1.1 原材料

树脂体系: 1304 增韧环氧树脂体系,中航复材(北京)科技公司;

增强体系: 8 步法编织结构预制体, 8 mm 厚, 中材科技股份有限公司织造, 威海拓展 T800 级碳纤维, 其结构如图 1 所示;

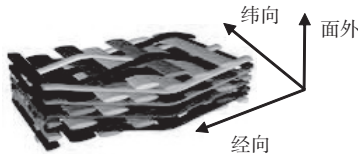


图 1 8 步法编织结构预制体

渗透率测试流体: 食用油, 市购, 室温下黏度 $0.0813\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

1.2 仪器及设备

旋转流变仪: AR2000 型, 美国 TA 仪器公司;

编织结构渗透率测试装置如图 2 所示。

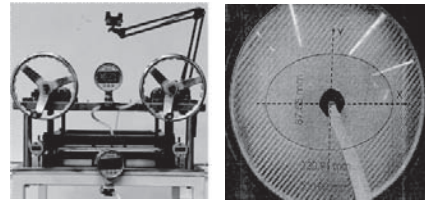


图 2 编织结构预制体渗透率测试模具

1.3 树脂体系工艺特性测试

采用旋转流变仪测试 1304 增韧环氧树脂体系黏度的升温曲线和保温曲线, 获得树脂 RTM 成型最佳注射温度和工艺窗口期。

1.4 编织结构预制体渗透率测试

采用径向法测试编织结构预制体面内渗透率^[5-10], 从模型中心浇注, 记录树脂流动前沿的位置和此时相对应的压力变化, 代入达西定律的二维形式, 经过换算得出面内渗透率计算公式:

$$K_x = \{R_0^2[2\ln(R_x/R_0) - 1] + R_0^2\}\eta\phi/4\Delta Pt \quad (1)$$

$$K_y = \{R_0^2[2\ln(R_y/R_0) - 1] + R_0^2\}\eta\phi/4\Delta Pt \quad (2)$$

式中: K_x ——经向渗透率;

K_y ——纬向渗透率;

η ——流体黏度;

ϕ ——孔隙率;

R_0, R_x, R_y ——注入半径, x 方向的流动前沿半径, y 方向的流动前沿半径;

t ——从开始注入到 R_x 或者 R_y 所用的时间;

ΔP ——流动前沿和注入口间的压力差。

采用单向饱和和流动法测试编织结构预制体面外渗透率^[11-14], 记录流体从预制体一侧流入, 到另一侧溢出(流体流动前锋流过预制体厚度)的时间 t , 代入下式得出预制体面外渗透率:

$$K_z = \frac{\mu\phi x_f^2}{2Pt} \quad (3)$$

式中: K_z ——面外渗透率;

x_f ——液体流动前锋位置;

μ ——树脂黏度;

P ——浇注压力。

1.5 RTM 成型树脂注射方案工艺仿真

采用 Hypermesh 软件对编织结构平板模型进行四面体网格划分, 编织结构平板的尺寸为 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 8.5\text{ mm}$, 共得到 3534 个节点和 7044 个网格。

采用 PAM-RTM 软件对 1304 树脂 / 8 步法编织结构预制体 RTM 成型树脂注射方案进行工艺仿

真,分别选取中心浇注、经向浇注、纬向浇注,调整浇注压力,通过模拟仿真,得到树脂充模时间,使之能够与 1304 增韧环氧树脂短时效的工艺窗口期相匹配。

2 结果与讨论

2.1 增韧环氧树脂工艺特性测试

树脂的黏度特性是 RTM 成型工艺的一个关键因素,树脂黏度过大,浇注压力相应要求较大,一方面对模具提出了更高要求,成本相应较大,另一方面较大的压力可能会使纤维预制体变形或移位,影响复合材料制件性能^[15]。所以,RTM 成型工艺通常选取较小的黏度完成树脂的注射。图 3 为 1304 增韧环氧树脂室温到 200℃温度-黏度曲线。从图 3 可以看出,树脂的黏度随着温度的增加呈现先下降后上升的趋势,在 165℃左右时黏度达到最低,约为 0.09 Pa·s,选取该温度为 1304 树脂 RTM 成型注射温度。这是由于 1304 树脂为增韧树脂体系,在 165℃以上增韧组分才能很好地与树脂本体交联,否则在注射过程中大分子增韧颗粒会被纤维预制体阻挡而无法均匀分布到整个预制体中。而在更高温度下,树脂黏度急剧上升,无法满足 RTM 成型要求。图 4 为稳定 165℃温度条件,1304 增韧环氧树脂时间-黏度曲线,由图 4 可以看出,保持 165℃温度不变,树脂黏度随着时间的增加而上升,树脂黏度可保持在 1 Pa·s 以下的时间约为 1500 s (25 min)。综上所述,设定 1304 增韧环氧树脂 RTM 成型注射温度为 165℃,浇注时间不超过 25 min。

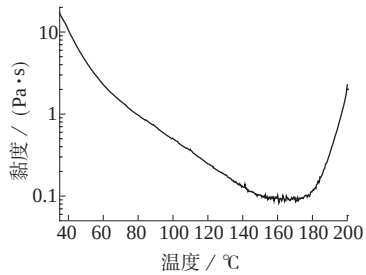


图 3 树脂温度-黏度曲线

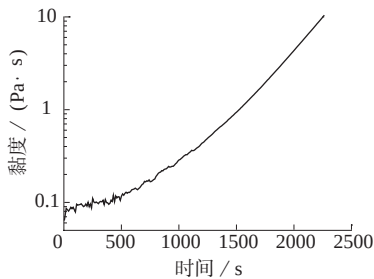


图 4 树脂 165℃时间-黏度曲线

2.2 8 步法编织结构预制体渗透率测试

测试 8 步法编织结构预制体面密度为 7469.53 g/m²,采用阿基米德排水法测试碳纤维密度为 1.81 g/cm³,通过计算得到其孔隙率为 0.484 1。采用编织结构渗透率测试装置,模具由上下带刻度的透明有机玻璃盖板外加四周框架组成,为保证密封性,有机玻璃盖板与框架模具之间设置有密封槽^[16],在装置的浇口进、出口设置有压力表,用于监测在流体注射过程中压力变化。从模型中心浇注,透过有机玻璃盖板观察并记录对应时间下流体流动前沿的位置及此时压力变化 ΔP ,见表 1(表中 X/Y 方向前锋位置为正负方向流动前锋的平均值),压力差均为 98.67 kPa, Z 向的流动时间为 3 s,代入式 (1), (2), (3) 中得到 8 步法编织结构预制体面内和面外渗透率。从表 1 可以看出,8 步法编织结构预制体的经向渗透率远高于纬向和面外 (Z 向) 渗透率。

表 1 8 步法编织结构预制体渗透率测试结果

流动时间/s	X/mm	Y/mm	Z
180	106.74	53.505	
240	124.24	58.005	
300	134.24	66.005	
360	142.74	71.505	
420	149.24	76.005	
480	156.74	81.005	
渗透率/m ²	3.82×10^{-11}	7.45×10^{-12}	4.26×10^{-12}

2.3 RTM 成型树脂注射方案工艺仿真

图 5 为中心浇注 RTM 成型浇注过程仿真结果。为了防止纤维预制体被冲刷变形,RTM 成型树脂浇注压力通常设置在 0.5 MPa 以内。浇注口 ($\varnothing=8$ mm) 设置在编织预制体中心,压力为 0.3 MPa,RTM 浇注过程仿真结果如图 5a 所示。由图 5a 可以看出,树脂充模完成所需时间约为 5710 s,远超过 1304 树脂工艺窗口期,不能满足 RTM 成型工艺要求;当将浇注压力增加到 0.5 MPa 时,其仿真结果如图 5b 所示,需要约 3430 s 才能完成树脂的注射,同样无法在树脂工艺窗口内完成充模过程。

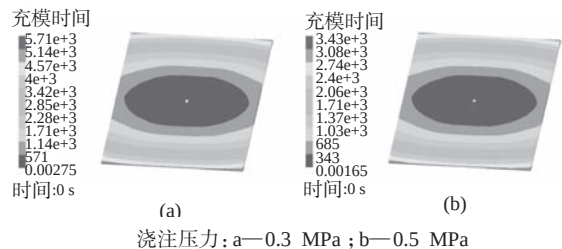


图 5 中心浇注 RTM 成型浇注过程仿真结果

图 6 示出纬向浇注 RTM 成型浇注过程仿真结果。从图 6 可看出,当浇注压力由 0.3 MPa 上升至 0.5 MPa 时,树脂的浇注时间由大约 4920 s 减少到 2950 s 左右,依旧无法满足 1304 树脂工艺窗口期的要求。但是在相同浇注压力下,采用线浇注相比于从中心点浇注,浇注时间大大缩短。

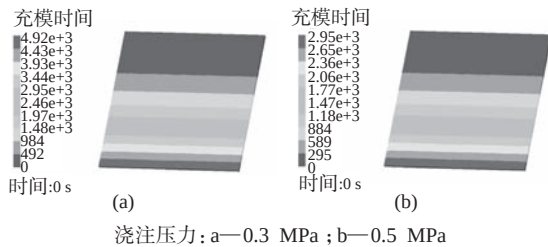


图 6 纬向浇注 RTM 成型浇注过程仿真结果

图 7 为编织结构预制体经向浇注 RTM 成型浇注过程仿真结果。从图 7 可以看出,当浇注压力设置为 0.3 MPa 时,树脂的充模时间为 966 s,可以满足 1304 环氧树脂苛刻的工艺操作要求;而当浇注压力下降到 0.2 MPa 后,浇注时间上升到约 1450 s,几乎达到了该温度下 1304 环氧树脂浇注的极限时间。在进行 RTM 成型时,为了保证模腔中吸附在预制体上的小分子空气充分排出,通常在出胶口进行抽真空处理,对浇注压力为 0.2 MPa,浇注出口压力为 -0.1 MPa 的 RTM 成型过程进行仿真,其结果如图 7c 所示,整个充模时间约为 943 s,与采用 0.3 MPa 注射时间相当,可以在规定时间内完成树脂注射。因此,为了与高韧性短时效 1304 环氧树脂工艺窗口期相匹配,在其 RTM 成型过程中,建议从编织结构预制体的经向进行线浇注,浇注压力设定为 0.2 MPa,浇口出口进行抽真空处理。

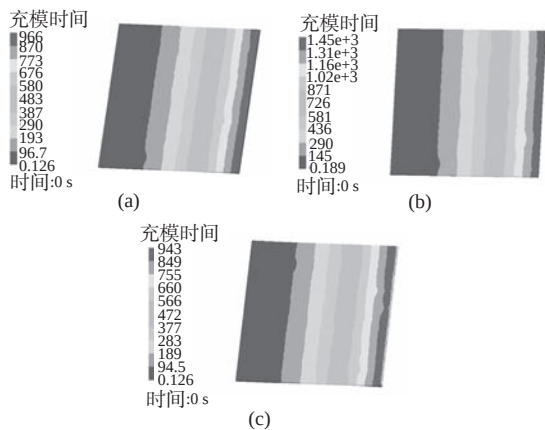


图 7 经向浇注 RTM 成型浇注过程仿真结果

3 结论

针对航空发动机用高韧性编织结构复合材料 RTM 成型工艺开展了增韧树脂基体的工艺特性及编织结构预制体的渗透特性研究,并结合 PAM-RTM 软件对 RTM 成型树脂注射过程进行了仿真模拟,对树脂注射流道和工艺参数进行了研究,结果如下:

(1) 1304 增韧环氧树脂 RTM 成型的最佳注射温度为 165℃,最佳注射时间在 25 min 以内;

(2) 8 步法编织结构预制体经向渗透率 $K_x=3.82 \times 10^{-11} \text{ m}^2$,纬向渗透率 $K_y=7.45 \times 10^{-12} \text{ m}^2$,Z 向(面外)渗透率 $K_z=4.26 \times 10^{-12} \text{ m}^2$,经向渗透率远大于纬向和 Z 向渗透率;

(3) 获得了航空发动机用高韧性编织结构复合材料 RTM 成型工艺方法即设计浇注流道为经向线浇注,浇注温度为 165℃,浇注口压力为 0.2 MPa,浇注出口压力为 -0.1 MPa,浇注时间约为 16 min。

参考文献

- [1] 严雪. 二维三轴编织复合材料刚度和强度性能研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2013.
Yan Xue. The study of mechanical properties of 2 D triaxial braided composites[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2013.
- [2] 董伟锋,肖军,李勇,等. 2.5 维编织复合材料弹性性能的理论研究[J]. 南京航空航天大学学报,2005(5):659-663.
Dong Weifeng, Xiao Jun, Li Yong, et al. Theoretical study on elastic properties of 2.5D braided composites[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2005(5):659-663.
- [3] Davis J G J. Overview of the ACT program[R]. FAA Report DOT/FAA/CT-92-25(II),2010 : 577-599.
- [4] Luycker E D, Morestin F, Boisse P. Simulation of 3D Interlock composite performing[J]. Composite Structure,2009,88(4):615-623.
- [5] Weitzenbock J R, Sheno A R, Wilson A P. Radial flow permeability measurement, Part A:Theory[J]. Composites:Part A,1999,30A:781-796.
- [6] Luo Yiwen, Verpoest I, Hoes K. Permeability measurement of textile reinforcements with several test fluids[J]. Composite Part A,2001,32:1497-1504.
- [7] Lai Y-H, Khomami B, Kardos J. Accurate permeability characterization of preforms used in polymer matrix composite fabrication processes[J]. Polymer Composites,1997,18(3):368-377.
- [8] Han K K, Lee C W, Rice B P. Measurements of the permeability of fiber preform and application[J]. Composite Science and Technology,2000,60:2435-2441.
- [9] Weitzenbock J R, Sheno R A, Wilson P A. Measurement of three-

- dimensional permeability[J]. Composites Part A, 1998, 29:159-169.
- [10] 蔡晶,祝颖丹,秦永利. LCM工艺中天然纤维渗透率的研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(4):85-90.
Cai Jing, Zhu Yingdan, Qin Yongli. Progress in permeability of natural fiber for liquid composites moulding[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(4):85-90.
- [11] Parnas R S, Howard J G, Luce T C, et al. Permeability characterization, Part I: A proposed standard reference fabric for permeability[J]. Polymer Composites, 1995, 16(6):429-445.
- [12] Alnioo S, Lekakon C. An experiment study of the permeability and capillary pressure in resin transfer moulding[J]. Composites Science and Technology, 2001, 61:1945-1959.
- [13] Ferland P, Guittand D, Trochu F. Concurrent methods for permeability measurement in resin transfer moulding[J]. Polymer Composites, 1996, 17(1):149-157.
- [14] Hammond V H, Loos A C. The effects of fluid type and viscosity on the steady-state and advancing front permeability behavior of textile preforms[J]. Journal of Reinforcement Plastics and Composites, 1997, 16(1):50-72.
- [15] 邓杰,刘建超. 一种适合于树脂传递模塑成型工艺的树脂基体及其碳纤维复合材料性能[J]. 高科技纤维与应用, 2005(5):13-15.
Deng Jie, Liu Jianchao. Study on properties of matrix resins and carbon fiber composites for resin transfer moulding[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2005(5):13-15.
- [16] 田正刚,夏雨,张垣. LCM工艺中注射压力纤维预成型体渗透率的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2005(2):32-33.
Tian Zhenggang, Xia Yu, Zhang Yuan. Influence of injection pressure on permeability of fiber preform in LCM[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2005(2):32-33.

欢迎订阅 2020 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

也可直接通过邮局或银行汇款向《工程塑料应用》杂志社订阅《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘,请注明订阅期刊/光盘的名称、收件人、邮编及地址。

《工程塑料应用》国内外公开发行的全国性塑料专业技术类刊物,月刊,大 16 开本,每月 10 日出版。本刊为中文核心期刊,是中国合成树脂供销协会会刊,荣获首届、第二届、第三届全国期刊奖等多项国家、省部级优秀期刊奖,入选美国化学文摘(CA)千种表。2020 年定价 20 元/期,全年 240 元。目前杂志社尚有部分 2000 年以来的单册和合订本库存,如需订阅,请联系杂志社。

《化学分析计量》国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物,双月刊,大 16 开本,单月 20 日出版。本刊为中国科技核心期刊,荣获多项省部级优秀期刊奖,入选美国化学文摘(CA)千种表。2020 年定价 20 元/期,全年 120 元。目前杂志社尚有部分 2000 年以来的单册和合订本库存,如需订阅,请联系杂志社。

《工程塑料应用》、《化学分析计量》合订本光盘 杂志社已将《工程塑料应用》自创刊号(1973 年)至 2019 年底共 47 卷 362 期的期刊电子化,并制成合订本光盘,现公开发售;同时也将《化学分析计量》自创刊号(1992 年)至 2019 年底

共 28 卷 133 期的期刊电子化,并制成合订本光盘,现公开发售。合订本光盘既可按作者、文题、关键词、年、期等分类查阅各期刊已发表的所有科技文章和科技信息的全文,又可根据读者自定义的关键词进行全文检索,非常方便、实用。《工程塑料应用》合订本光盘优惠售价 550 元;《化学分析计量》合订本光盘优惠售价 250 元。

邮局汇款:

收款地址:济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位:《工程塑料应用》杂志社

邮编:250031

电话:(0531)85878223 85878057 85878278

传真:(0531)85947355

银行汇款:

户名:山东非金属材料研究所

开户银行:济南市工商银行经十一路支行

帐号:1602001229014425546

网上订阅: <http://www.epa1973.net>