复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第28卷 第3期 6月 2011年
Vol. 28 No. 3 June 2011

文章编号：1000-3851(2011)03-0203-07

基于水溶性型芯的RTM成型的整体化复合材料翼盒研制

罗楚养[1,2]，熊峻江*[1]，益小苏[2]，张子龙[2]，包建文[2]，安学锋[2]，王 岭[2]
（1. 北京航空航天大学 交通科学与工程学院，北京 100191；2. 北京航空材料研究院 先进复合材料重点实验室，北京 100095）

摘 要： 采用全数字化设计技术完成了复合材料整体翼盒的结构设计及铺层设计，同时采用PAM-RTM软件对复合材料翼盒的树脂传递模塑(RTM)成型工艺过程进行了树脂流动模拟，确定了底边线注射的最佳注射方式和工艺参数，并在此基础之上完成了RTM成型模具的设计和制造。采用基于水溶性型芯的RTM整体成型技术，制备了整体化的复合材料翼盒，验证了翼盒的RTM整体成型设计与制造工艺技术的有效性和可行性。

关键词： 复合材料；翼盒；树脂传递模塑(RTM)；流动模拟；水溶性型芯

中图分类号： TB330.1；V261.94 **文献标志码：** A

Design and manufacture of RTM-made composite wing box based on the water-soluble mandrel

LUO Chuyang[1,2], XIONG Junjiang*[1], YI Xiaosu[2], ZHANG Zilong[2], BAO Jianwen[2], AN Xuefeng[2], WANG Ling[2]
(1. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. Advanced Composites Key Laboratory, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: Based on the techniques of water-soluble mandrel and digital design, the integrated composite wing box was designed and manufactured by the resin transfer molding (RTM) process. The optimized injection pattern and process parameters were determined by the PAM-RTM code and the RTM mould was designed and fabricated from the results of resin flow simulation. According to the fiber overlay design and forming process, the integral composite wing box was manufactured to verify the validity and feasibility of the RTM technique for the integrated wing box.

Keywords: composite; wing box; resin transfer molding (RTM); flow simulation; water-soluble mandrel

先进复合材料的低成本化已是当前复合材料结构发展和应用的核心问题[1-2]，包括低成本的设计、材料和制造技术，复合材料结构的“材料-结构-功能”的一体化和“设计-制造”的数字化技术是实现复合材料低成本的重要手段，以树脂传递模塑技术(RTM)为代表的液态成型技术正成为实现大型复杂复合材料结构的“材料-结构-功能”一体化的应用潮流[3]，而基于CAD、CAE和CAM等计算机软件的虚拟设计、制造和验证的数字化技术，也日益受到关注和重视。作为飞机复合材料结构的典型重要部件，整体化的复合材料机翼研制一直是国际航空制造领域的研究热点和前沿。Dexter H B等[4]讨论了纺织复合材料机翼的特点及其低成本成型技术。Qi B等[5]探讨了复合材料翼盒的树脂膜熔渗(RFI)制造技术。Teufel P等[6]研究了通用飞机复合材料机翼的设计及成型工艺，结果表明，采用共固化技术将RTM成型的机翼壁板组装起来所形成的机翼各部件可获得低成本、高性能的通用飞机复合材料机翼。刘兵山等[7]采用胶接方法制备复合材料翼盒，并对其进行了模态分析和试验。段跃新等[8]模拟了I型加筋翼盒壁板的RTM充模过程，并优化了工艺参数，研究了渗透率不均匀对充模工艺的影响，最后制备了翼盒加筋壁板。迄今为止，有关RTM成型的整体复合材料翼盒研制方面的研究工作鲜有报道。本文作者对整体成型复合材料翼盒的“设计-制造”数字化技术和RTM成型工艺进

收稿日期： 2010-07-24；**收修改稿日期：** 2010-12-09
基金项目： 国家自然科学基金(E050603)；航空科学基金(20095251024)
通讯作者： 熊峻江，教授，研究方向为疲劳断裂可靠性 E-mail：jjxiong@buaa.edu.cn

行探讨，通过制备复合材料翼盒，验证了设计技术和制造工艺的有效性与可行性。

1　复合材料翼盒制造工艺参数优化

RTM 工艺属于闭模成型工艺，树脂基体在纤维间的流动特性直接影响 RTM 制件的性能，因此，RTM 工艺的的流动模拟和工艺参数优化是 RTM 成型工艺的重要内容[9-15]。树脂在纤维中的流动过程可认为是流体(树脂)在多孔介质中的渗流过程。假设预成型体在模腔中固定不动，并且模具的型腔尺寸比纤维增强体的孔隙大得多，忽略惯性效应和表面张力，用描述牛顿流体流过多孔介质的 Darcy 定律[16]代替动量方程来描述树脂流动行为，在直角坐标系下的三维流动体系中，速度矢量是由对应着的 x、y 和 z 三个方向上的 v_x、v_y 和 v_z 组成，Darcy 定律可以表示为

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = -\frac{1}{\mu}\begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dfrac{\partial P}{\partial x} \\ \dfrac{\partial P}{\partial y} \\ \dfrac{\partial P}{\partial z} \end{bmatrix} \tag{1}$$

其中：$\boldsymbol{S}_{ij}(i,j = x,y,z)$ 为渗透率张量。对不可压缩性流体其连续性方程可简化为

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \tag{2}$$

在许多复合材料液态成型制件的厚度尺寸远小于平面尺寸，因此，在薄模腔的充模过程中，式(1)可简化为二维 Darcy 定律：

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = -\frac{1}{\mu}\begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dfrac{\partial P}{\partial x} \\ \dfrac{\partial P}{\partial y} \end{bmatrix} \tag{3}$$

采用PAM-RTM流动模拟软件，模拟翼盒在 RTM 成型过程中的树脂流动，为 RTM 成型模具的设计提供参考，并优化工艺参数。采用 2.5 维有限元模型，共生成 60880 个三角形单元(如图 1 所示)。忽略厚度方向的渗透率影响，设定树脂黏度 $\upsilon=0.1$ Pa·s，预成型体渗透率 $k_0=1.0\times10^{-11}$ m^2，孔隙率为 0.5，注射压力 $P=0.1$ MPa，把翼盒三角区以及与模具贴合的边设置为快速流道，渗透率为 $k_1=1.0\times10^{-10}$ m^2，如图 2 所示注胶方式的计算结果如图 3 所示。可以看出，底边线注胶和底边点注射的出胶位置比较集中，容易安排出胶口，其他四

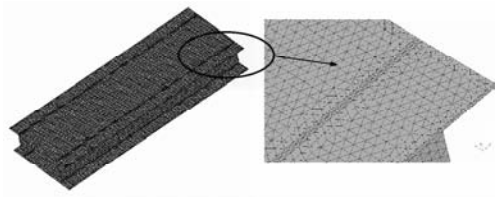

图 1　翼盒流动模拟有限元模型

Fig. 1　Finite element model of wing box for flow simulation

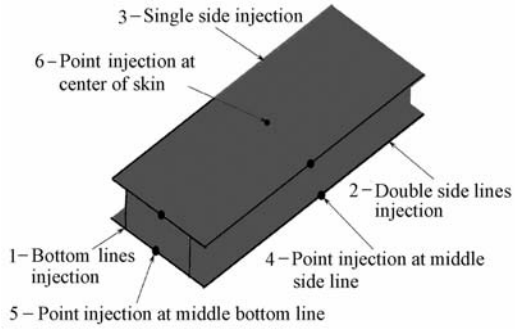

图 2　翼盒上六种注射方式

Fig. 2　Six injection patterns on the wing box

种注射方式的出胶位置分散，难以布置出胶口。图 4为不同充模方式下的充模时间对比。图 4 表明，线注胶的效率比点注胶的效率高很多，底边线注胶的树脂填充时间最短，蒙皮中点注射的填充时间最长。综合考虑流动方式和填充时间等因素，选择底边线注射为最佳注胶方式(如图 3(a)所示)。

2　模具设计与水溶性型芯

2.1　模具设计

模具的设计与制造是 RTM 成型的关键，模具应该能够满足包括合模、注胶、开模等工艺环节的使用要求。根据上节流动模拟结果，翼盒注胶模具，采用上下对合模，两头加端盖设计，在下模和端盖上分别开两道密封槽进行密封，注射方式为底边线注射，在上、下模各开 12 个出胶口，另一端盖开 8 个出胶口(如图 5(a)所示)。为了纤维铺层和脱模方便，左右两个 C 型芯块均设置拔模角，这样蒙皮不需修边即可轻松放入型腔内(如图 5(b)所示)。左右两侧芯模采用钢模，中间完全封闭的芯模采用水溶性型芯，上、下模采用通孔螺栓进行紧固，端盖采用螺钉紧固，上、下模和端盖均设置销钉进行定位；同时，设置顶丝孔以方便脱模。左右两侧芯模靠楔形块定位，并设置顶丝孔(如图 5(c)所

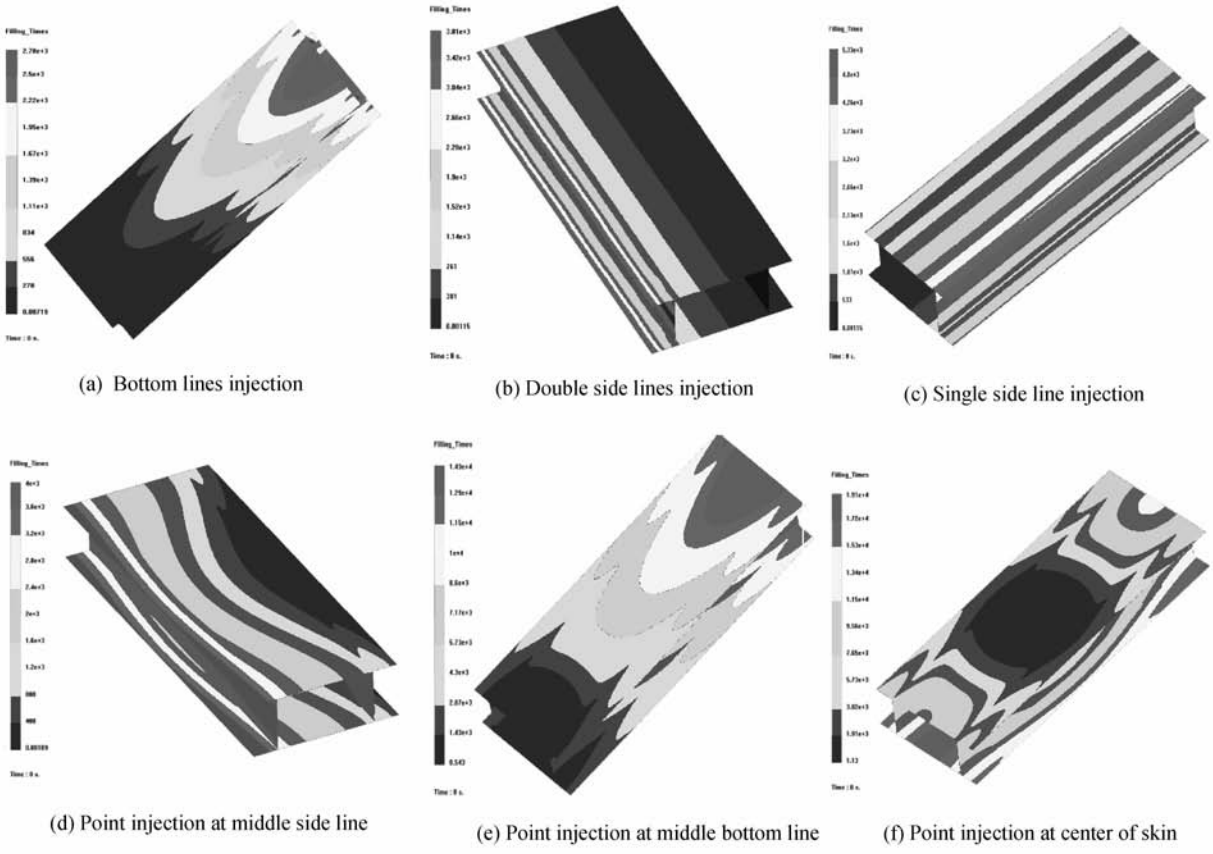

图 3　六种不同注射方式树脂充模时间分布

Fig. 3　Filling time distributions of six injection modes

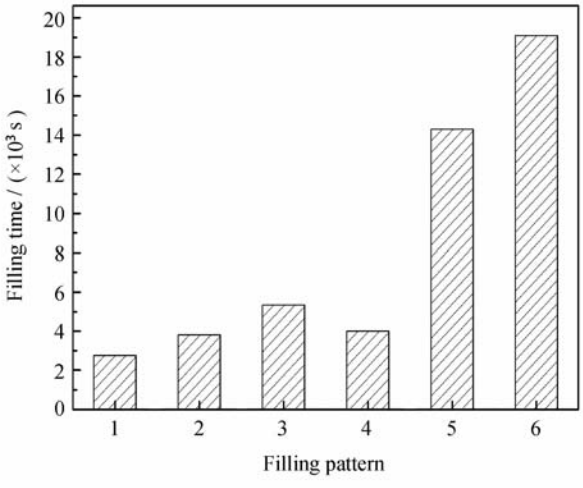

图 4　六种注射方式的充模时间比较

Fig. 4　Comparison of filling time of six injection modes

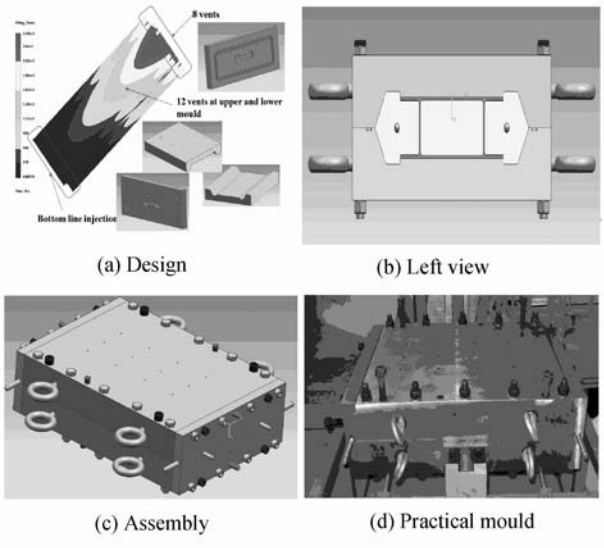

图 5　翼盒注胶模具

Fig. 5　RTM injection mould of wing box

示）。图 5(d)为加工后的实际模具。水溶性型芯模具如图 6 所示，为了脱模方便，把模具分成 6 块，脱模时，先打开端盖，再用顶丝把上模顶松，翻面，左右侧板轻敲即可脱模。在型芯中间放置刚性骨架（如图 6(a)所示），骨架两端与 RTM 注胶模具的端盖相互配合（如图 6(b)所示），用以定位水溶性型芯，保证制件尺寸精度，同时，骨架还对型芯起到增强作用，防止合模过程将型芯压溃。

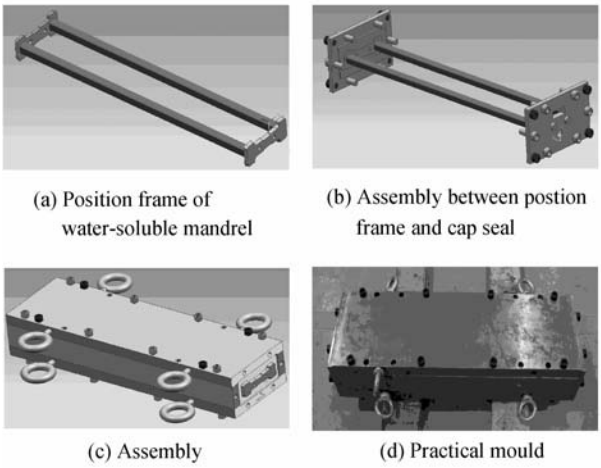

图 6　水溶性型芯模具

Fig. 6　Mould of water-soluble mandrel

2.2　水溶性型芯的制备

在 RTM 工艺中，型芯与 RTM 模具共同确定了复合材料翼盒形状。采用水溶性陶瓷型芯，遇水即溶，具有质轻、环保、周期短、成本低、便于操作和脱模等优点，其材料性能如表 1 所示。可以看出，水溶性型芯具有较好的耐热性能（20～220 ℃），能满足 5284 环氧树脂 180 ℃固化温度的使用要求，且其压缩强度(12.56 MPa)也足以抵抗合模压力。根据表 1 中的热膨胀系数，可以估算型芯长度方向烘干过程的尺寸变化值：$\Delta l = 800 \times 1.63 \times 10^{-6} \times (130-20) = 0.143$ mm，高度方向和宽度方向的尺寸变化分别为 0.034 mm 和 0.035 mm。可见，水溶性型芯尺寸稳定性很好，能够保持翼盒的尺寸精度。图 7 示出了其工作原理，水溶性型芯材料由粘结剂和陶瓷填料组成，粘结剂为有机高分子材料，具有脱水固化、遇水溶解的可逆特性；陶瓷填料由氧化铝和高岭土组成，陶瓷料浆的固相体积分数使粘结剂具有良好的水溶性和高的热分解温度(≥350 ℃)，所以选择陶瓷粉末作为填料。水溶性型芯制备包括模具清理、合模、配料、浇注、脱模、烘干和贴膜等过程(如图 8 所示)，具体过程如下：(1) 将浇注陶瓷型芯的模具型腔用丙酮擦洗干净，并贴上一层脱模用的聚四氟乙烯胶膜，同时，涂上植物油以方便脱模，合模备用；(2) 将水溶性树脂溶入适量的水和丙酮中，充分搅拌，使其完全溶解；再将一定配比的陶瓷粉末填料加入到粘结剂水溶液中，充分搅拌，使其混合均匀；(3) 称取一定量的固化剂加入到混合溶液中，充分搅拌使其分散均匀；(4) 将混合好的陶瓷料浆

表 1　水溶性型芯材料性能

Table 1　Material properties of water-soluble mandrel

Thermal expansion coefficient/$℃^{-1}$	Density/ ($g \cdot cm^{-3}$)	Thermal stability/℃	Compressive strength/ MPa
1.63×10^{-6}	0.85	20～220	12.56

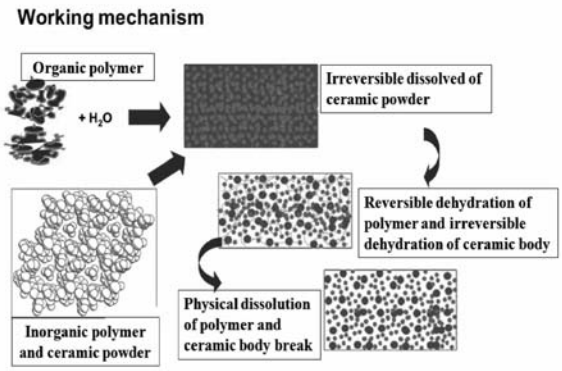

图 7　水溶性型芯工作原理

Fig. 7　Working mechanism of water-soluble mandrel

浇注到事先准备好的模具中，待料浆填充满模具后，室温静置数小时使料浆固化。固化完全后脱模，将陶瓷型芯放入烘箱加热干燥。为防止升温过快造成型芯开裂，试验时以 20 ℃为一个梯度进行升温，最高温度为130 ℃，烘干过程进行 3 次翻面以加快烘干过程，具体升温降温流程如图 9 所示。型芯烘干后，在其表面涂上一层纳米材料保护膜进行封孔处理，并贴上一层聚四氟乙烯膜，保证型芯表面光洁度，同时防止树脂渗入型芯。

3　翼盒制备

3.1　原材料与铺层设计

选用国产 U3160 单向无纬帘子布和 CF3031 斜纹碳纤维机织物作为增强体，其材料性能如表 2 所示。基体采用北京航空材料研究院研制的 5284 环氧树脂，其材料性能如表 3 所示。可以看出，作为一种专用高温 RTM 环氧树脂，5284 具有良好的流动性，可以与纤维增强体很好的浸润，并且开放期长，工艺成本低，力学性能良好，同时，还具有较高的使用温度。图 10 为 5284 树脂 80 ℃老化后的黏温曲线。辅料包括质量分数为 10%的定型剂(溶剂为丙酮和四氢呋喃溶液)。

根据翼盒受载情况，翼盒纤维铺层方案为蒙皮和腹板表面均采用一层±45°的 CF3031 斜纹碳布

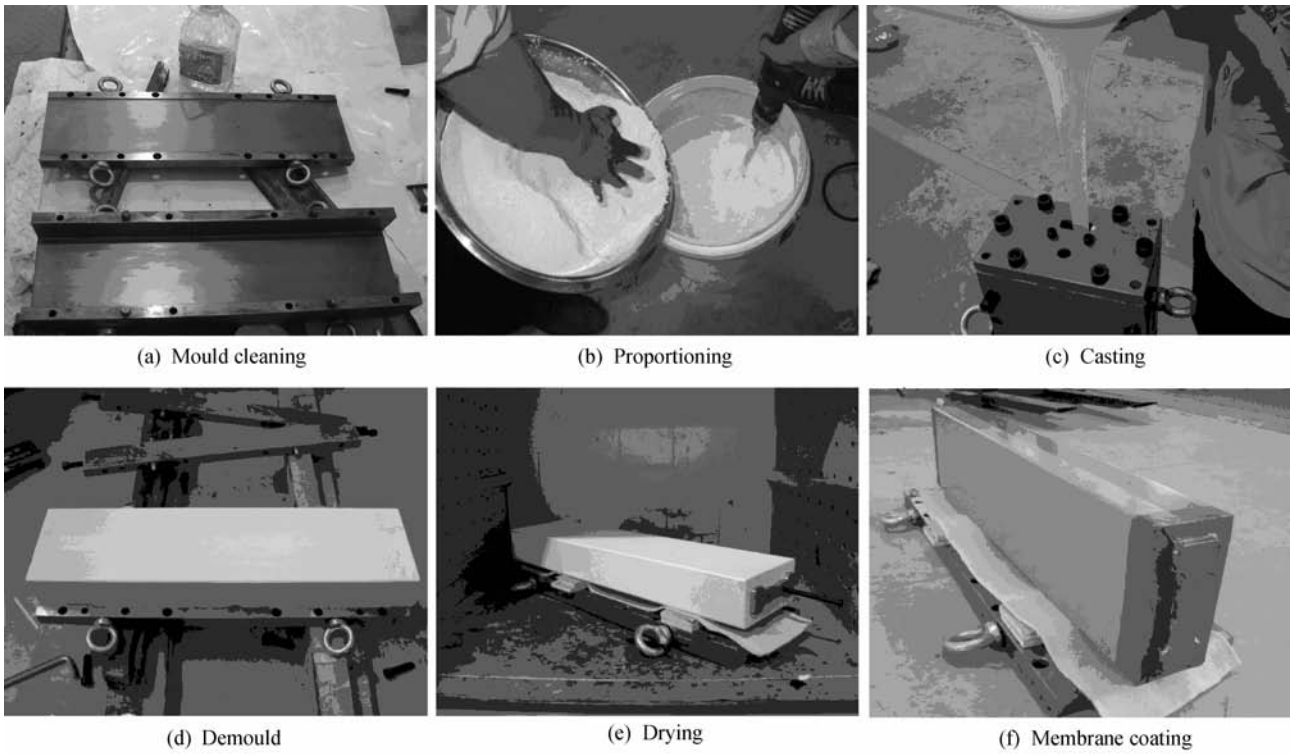

图 8　水溶性型芯制备工艺过程

Fig. 8　Process of water-soluble mandrel

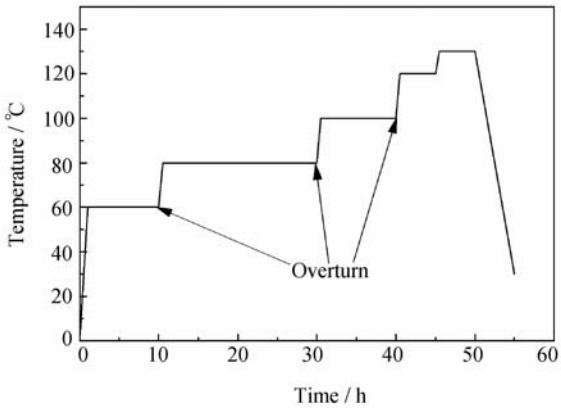

图 9　水溶性型芯烘干工艺流程图

Fig. 9　Flowchart of water-soluble mandrel drying process

表 2　U3160 单向无纬帘子布碳布和 CF3031 斜纹碳纤维机织物材料参数

Table 2　Material properties of U3160 and CF3031 carbon fiber

Parameters		CF3031	U3160
Ply thickness/mm		0.30±0.02	0.167
Area density/(g·m^{-2})		220±7	160±10
Fabric density/(tows/100 mm)	Warp	54±2	80±4
	Weft	54±2	40±2
Tensile breaking strength/(N·25 mm)	Warp	≥1600	1800
	Weft	≥1600	—

表 3　5284 环氧树脂浇铸体的基本性能

Table 3　Properties of 5284 epoxy resin

Parameters	Values	Parameters	Values
Density/(g·cm^{-3})	1.2	Viscosity/(mPa·s)	<400
Tensile strength/MPa	80	Curing temperature/℃	<200
Tensile modulus/GPa	3.4	Curing time/h	<4
Flexural strength/MPa	151	T_g/℃	195
Flexural modulus/GPa	3.7		

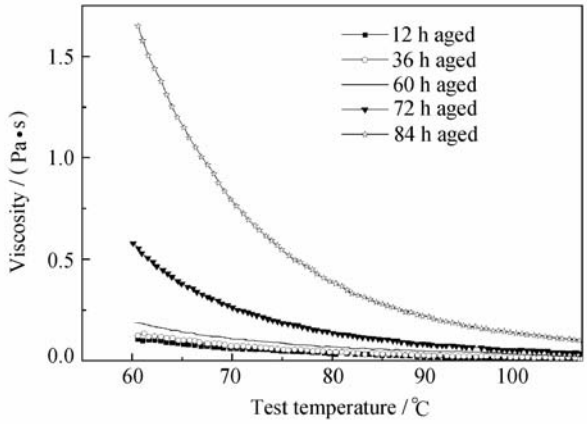

图 10　5284 树脂 80 ℃老化后的黏温曲线

Fig. 10　Relationship between viscosity and temperature of 5284 resin after different aged time at 80 ℃

铺覆，其余采用 U3160 单向带。铺层方案如下：蒙皮[(±45)/0/45/0/−45/0/45/90/−45/0/45/0/−45/0/45/90/−45/0]，厚度 3 mm，共 18 层；梁腹板 [(±45)/0/45/90/−45/0/45/90/−45/45/0/−45]$_S$，厚度 4 mm，共 24 层。由基体流动模拟可知，蒙皮与梁交接处形成的三角区如不进行填充，将会形成快速流道，最终影响制件质量。三角区采用 U3160 单向带进行填充，填充截面积为

$$A = 2R \times R - \frac{1}{2}\pi R^2 = \left(2 - \frac{3.14}{2}\right) \times 7^2 = 21.07\ \mathrm{mm}^2 \tag{4}$$

按体积分数 55%计算，每个三角区需要填充的根数为

$$n = \frac{AV_f\rho_v}{\rho_l} = \frac{21.07 \times 0.55 \times 1.78 \times 10^{-3}}{0.2 \times 10^{-3}} \approx 103\ \text{根} \tag{5}$$

式中：A 为三角区截面积；V_f 为纤维体分；ρ_v 为纤维体密度；ρ_l 为纤维线密度。最终铺层如图 11 所示。

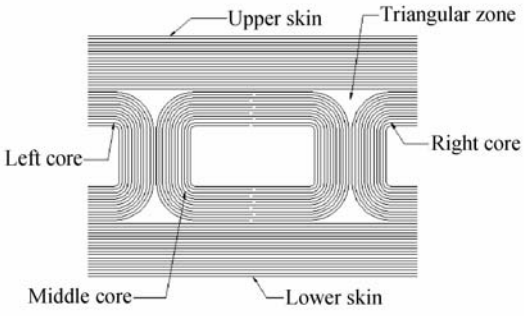

图 11　翼盒铺层方案

Fig. 11　Ply overlay configuration of wing box

3.2　翼盒 RTM 工艺流程

RTM 成型工艺包括定型、下料、铺覆、合模、注胶、固化、脱模等流程(如图 12 所示)。首先，对 U3160 无纬帘子布和 CF3031 斜纹织物进行定型处理，然后，按照下料模板进行下料，将表面带有定型剂的碳纤维织物按照铺层顺序依次铺放在芯模上，并用熨斗熨紧(如图 13(a)所示)。把定型好的预成型体装模，在下模中组合形成制件型腔后，对 C 型梁形成的三角区进行填充(如图 13(b)所示)，按照计算的填充量完成三角区填充后，将上蒙皮放入两个 C 梁形成的型腔内，并在侧模边缘填上腻子

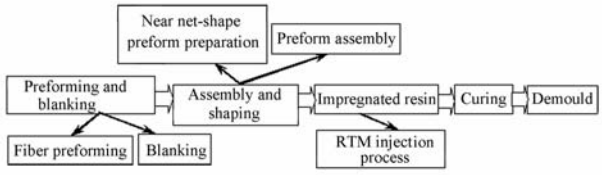

图 12　RTM 工艺流程

Fig. 12　Flowchart of RTM process

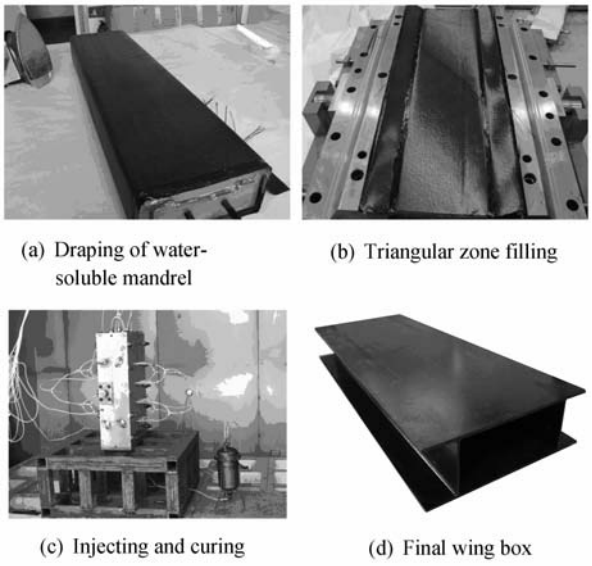

图 13　翼盒制备工艺流程

Fig. 13　RTM process of wing box

条以防止形成快速流道，合模翻面，以同样的方法对三角区进行填充。合模并接上阀门和管路，便可进行注胶(如图 13(c)所示)。注胶工艺流程为：(1) 以5 ℃/min 的升温速率将模具温度升至 80 ℃，然后，保温 1 h，同时，对模具和注胶罐抽真空；(2) 以0.05 MPa 的注射压力进行注胶，然后把压力逐级升至 0.4 MPa，并循环放胶憋胶；(3) 升温固化。以 5 ℃/min 的升温速率将模具温度升至 180 ℃，保温 2 h；关闭烘箱，自然冷却到室温即可。脱模并去掉水溶性型芯，便可得到最终的制件(如图 13(d)所示)。

4　结　论

(1) RTM 流动模拟可对成型模具的设计提供指导，并可对 RTM 成型工艺参数进行一定的优化，从而降低工艺成本。模拟结果表明，对于双工字梁翼盒结构，底边线注射为最佳注射方式。

(2) 采用水溶性型芯可方便中间芯模的脱模，同时，采用纳米涂料对水溶性型芯表面进行封孔处

理，并贴上聚四氟乙烯膜，不仅防止树脂渗入型芯，还保证了型芯表面的光洁度；型芯中间骨架的定位保证了翼盒的尺寸精度。

（3）制备了整体成型复合材料翼盒典型件，实体验证了数字化设计及整体化成型工艺技术的有效性和可行性，为 RTM 整体成型复合材料翼盒的数字化设计、工艺与制备提供参考。

参考文献：

[1] 陈绍杰. 浅谈复合材料的整体成型技术 [J]. 高科技纤维与应用，2005，30(1)：6-9.
Chen Shaojie. Integrity technology of composite [J]. Hi-Tech Fiber and Application，2005，30(1)：6-9.

[2] 范玉青，张丽华. 超大型复合材料机体部件应用技术的新进展：飞机制造技术的新跨越 [J]. 航空学报，2009，30(3)：534-543.
Fan Yuqing，Zhang Lihua. New development of extra large composite aircraft components application technology：Advance of aircraft manufacture technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2009，30(3)：534-543.

[3] 益小苏，许亚洪，唐邦铭，等. 复合材料结构－功能一体化技术与吸能结构的研究 [J]. 材料工程，2004(9)：3-8.
Yi Xiaosu，Xu Yahong，Tang Bangming，et al. Study on energy absorption behavior of composite tubes and integrated manufacturing of composite structure [J]. Journal of Materials Engineering，2004(9)：3-8.

[4] Dexter H B. Development of textile reinforced composites for aircraft structures [C] // 4th International Symposium for Textile Composites. Kyoto：Kyoto Institute of Technology，1998：12-14.

[5] Qi B，Raju J，Kruckenberg T，et al. A resin film infusion process for manufacture of advanced composite structures [J]. Composite Structures，1999，47：471-476.

[6] Teufel P，Maxwell M，Gardiner R. Low cost composite manufacturing method for a general aviation aircraft wing [C]// AIAA/ICAS International Air and Space Symposium and Exposition—The Next 100 Year. Ohio：Dayton，2003：1-10.

[7] 刘兵山，燕　瑛，钱　卫，等. 复合材料机翼盒段的设计、模态分析和试验 [J]. 北京航空航天大学学报，2003，29(11)：1026-1028.
Liu Bingshan，Yan Ying，Qian Wei，et al. Design，modal analysis and tests of composites wing box [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2003，29(11)：1026-1028.

[8] 段跃新，孙玉敏，张佐光. RTM 工艺工字梁构件的模拟与实验研究 [J]. 航空学报，2006，27(6)：1223-1228.
Duan Yuexin，Sun Yumin，Zhang Zuoguang. Study on simulation and experimentation of H wallboard for RTM processing [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2006，27(6)：1223-1228.

[9] 邱婧婧，段跃新，梁志勇. RTM 工艺参数对树脂充模过程影响的模拟与实验研究 [J]. 复合材料学报，2004，21(6)：70-74.
Qiu Jingjing，Duan Yuexin，Liang Zhiyong. Computer simulation and actual experiments of RTM mold filling process affected by processing parameters [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2004，21(6)：70-74.

[10] 姚福军，段跃新，肇　研. RTM 工艺树脂注射温度优化 [J]. 复合材料学报，2007，24(3)：105-108.
Yao Fujun，Duan Yuexin，Zhao Yan. Optimization of resin injection temperature for RTM process [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2007，24(3)：105-108.

[11] 吴晓青，李嘉禄. 基于单向流动研究三维编织预制件的渗透型 [J]. 复合材料学报，2007，24(3)：116-120.
Wu Xiaoqing，Li Jialu. Permeability of 3D braided preform based on unidirectional flow measurement [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2007，24(3)：116-120.

[12] 戴福洪，张博明，杜善义，等. 复杂形状三维薄壁构件 RTM 制造工艺注模过程模拟 [J]. 复合材料学报，2004，21(2)：87-91.
Dai Fuhong，Zhang Boming，Du Shanyi，et al. Simulation of mould filling in RTM process for 3D complex shape thin shell parts [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2004，21(2)：87-91.

[13] 戴福洪，张博明，杜善义. RTM 工艺注模过程边缘效应模拟分析 [J]. 复合材料学报，2004，21(2)：161-167.
Dai Fuhong，Zhang Boming，Du Shanyi. Simulation analysis of edge effects during mould filling in RTM process [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2004，21(2)：161-167.

[14] 戴福洪，张博明，杜善义，等. 厚截面构件 RTM 注射工艺树脂流动过程模拟 [J]. 复合材料学报，2004，21(3)：6-10.
Dai Fuhong，Zhang Boming，Du Shanyi，et al. Resin flow simulation in RTM process for thick section parts [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2004，21(3)：6-10.

[15] 白江波，熊峻江，程　序，等. RTM 成型复合材料 T 型接头工艺参数优化与力学性能实验研究 [J]. 复合材料学报，2009，26(3)：13-14.
Bai Jiangbo，Xiong Junjiang，Cheng Xu，et al. Processing parameter optimization and experimental investigation on mechanical properties for RTM composite T-joint [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2009，26(3)：13-14.

[16] Timothy G G. Advanced composites manufacturing [M]. New York：John Wiley & Sons，Inc.，1997：426-438.