

# 基于 VARTM 工艺的大型闭合截面复合材料箱体的研制

崔敏<sup>1</sup> 程泽林<sup>2</sup> 陈英<sup>2</sup> 张毅<sup>2</sup>

(1 海军驻北京地区特种导弹专业军事代表室,北京 100076)

(2 航天材料及工艺研究所,北京 100076)

**文 摘** 研究了 VARTM 工艺用树脂基体的黏流特性,进行了平板验证试验,并采用 PAM-RTM 软件对复合材料箱体的工艺过程进行模拟,确定了最佳注射方案和工艺控制参数,采用主体阳模的 VARTM 工艺,制备了复合材料箱体试验件,对贮运发射箱 VARTM 工艺成型的有效性及其可行性进行了验证。

**关键词** 复合材料,复合材料箱体,VARTM

## Design and Manufacture of VARTM-Made Composite Container With Close Section

Cui Min<sup>1</sup> Cheng Zelin<sup>2</sup> Chen Ying<sup>2</sup> Zhang Yi<sup>2</sup>

(1 Navy Stationed in Beijing Area of Special Professional Military Representative of the Missile Room, Beijing 100076)

(2 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

**Abstract** Based on the viscosity study of resin for VARTM, the manufacturing of testing laminates, and the resin flow simulation of composite container with PAM-RTM, the optimized injection pattern and process parameters were determined. The composite container was manufactured to verify the validity and feasibility of the VARTM technique for the composite container.

**Key words** Composite, Composite container, Vacuum assisted resin transfer molding (VARTM)

### 0 引言

贮运发射箱兼具贮存、运输和发射功能,箱体内部设有导弹发射所必需的导轨等机构,箱体要求有较好的质量/强度比、质量/刚度比、灵活的机动性和良好的内腔精度<sup>[1~2]</sup>,虽然复合材料本身具有的较高比强度、比刚度和整体性能,但箱体复杂的内部结构和精度要求给复合材料的成型增加了一定难度。选用何种成型手段在确保发射箱体整体结构和精度的同时,实现快速、有效、低成本共固化成型成为复合材料专业研究的方向之一。本文采用真空辅助树脂传递模塑成型技术进行了贮运发射箱的研制。

真空辅助树脂传递模塑成型技术(VARTM)是一种低成本<sup>[3~4]</sup>的复合材料大型构件成型制造技术,其过程可以分解成两个平行的子过程:流动、浸润、浸渗、充模等物理过程和由低黏度液态树脂转变为固体材料的化学反应过程<sup>[5]</sup>。

本文主要针对典型的闭合截面复合材料箱体,开展了 VARTM 成型工艺用低黏度环氧树脂的黏流特

性研究,在 VARTM 成型平板试验的基础上,采用 PAM-RTM 软件进行工艺参数的确定和优化,摸索大型结构件的 VARTM 成型工艺流程、方法及过程控制要点。

### 1 材料及平板试验

#### 1.1 树脂体系筛选

VARTM 工艺中整个树脂的填充过程是不可压缩流体在静止的多孔介质中渗流、浸润、充满的过程,一般采用描述牛顿流体流过多孔介质的 Darcy 定律<sup>[6]</sup>代替动量方程来描述树脂流动行为,预测单位面积上流动速率( $\frac{Q}{A}$ )与压力梯度( $\frac{\Delta p}{L}$ )成正比,与树脂黏度( $\mu$ )成反比,可以表示为:

$$\frac{Q}{A} = \frac{K}{\mu} \cdot \frac{\Delta p}{L} \quad (1)$$

式中, $K$ 为增强材料的渗透率。对于直角坐标系下的三维流动体系,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,则:

$$\frac{Q}{A} = \begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{Bmatrix} = -K \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \\ \frac{\partial P}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(1)转化为:

$$\begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{Bmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xz} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{yz} \\ S_{zx} & S_{zy} & S_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \\ \frac{\partial P}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3)$$

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

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

对于厚度尺寸远小于平面尺寸的复合材料液态成型制品,这种薄模腔的充模过程可简化为二维 Darcy 定律:

$$\begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \end{Bmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (5)$$

理论上增强材料的 K 取决于纤维的几何形状(孔间距),由于此次使用的缝编布是一种织物,其经纬间距可调,所以在 VARTM 工艺中,对缝编布而言,整个增强体的渗透率应该被视为可以调节的模型参数,由其材料特性及规格决定。在试验中,通过更改缝编布的规格,测试其流动速率存在一定差异,验证了 VARTM 缝编布渗透率可通过缝编形式进行调节。对于后续产品的研制,可根据充模要求进行织物结构设计,兼顾纤维体积含量及成型效率。

从公式(1)、(3)、(5)中可以看出, VARTM 充模时间也与树脂的黏度密切相关,高黏度导致的预热或长时间注射,显然对成型大型复合材料构件不可取。以前期试验的某高性能环氧树脂为例,树脂的黏温曲线见图 1,其黏度对温度变化表现较为敏感,一旦温度下降,黏度将迅速上升,图 1 中显示其最低黏度仅约 100 mPa·s,但室温黏度却高达约 1.3 Pa·s。为降低大型构件的树脂充满风险,需采用长时间加热注射,注射的整个系统环境,包括模具、注射管路等均需加热,经济成本和机会成本均较高,不利于产品研制宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012 年 第 4 期

的可靠性和低成本化。

为实现液态树脂对于态纤维结构的浸润、浸渗和浸渍,通常要求树脂的工作黏度越低越好,工作状态的开放期应相对较长以满足大型构件的浸渍需要,若该树脂黏度范围为室温黏度则可常温注射,不需额外的加热装置,可降低成型难度并节约成本。典型 RTM 专用树脂的工作黏度范围见图 2<sup>[5]</sup>。

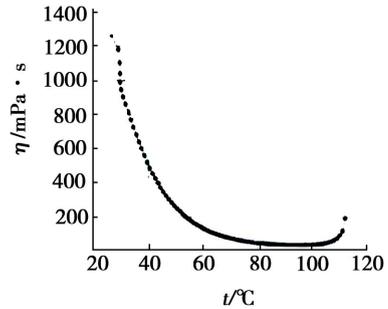


图 1 某环氧树脂的黏温曲线

Fig. 1 Relationship between viscosity and temperature of some epoxy resin

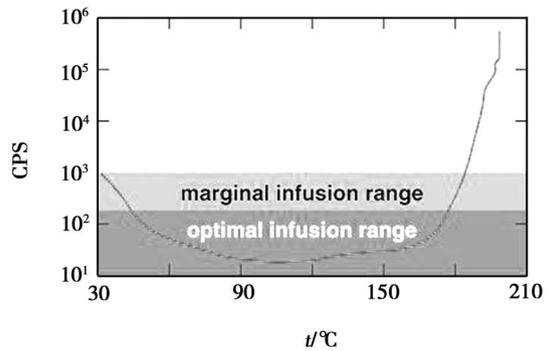


图 2 典型 RTM 专用树脂的工作黏度范围<sup>[5]</sup>

Fig. 2 Viscosity range of typical RTM resin

综合考虑使用环境、树脂适用期等因素,选用了武汉理工大学研制的环氧树脂体系,其相关的性能参数见表 1, 20℃ 的黏度约为 150 mPa·s。

表 1 环氧树脂的基本性能

Tab. 1 Properties of epoxy resin

拉伸强度	拉伸模量	压缩强度	弯曲强度	弯曲模量	黏度
/MPa	/GPa	/MPa	/MPa	/GPa	/(mPa·s) (20℃)
86.0	2.9	132.8	132.4	3.0	150

## 1.2 平板试验

### 1.2.1 原材料

为降低成本、便于铺层操作,同时保持复合材料良好的整体性能,增强材料选用由航天材料及工艺研究所缝编中心供应的缝编玻璃布,基体选用武汉理工

大学材料学院研制的低黏度环氧树脂。

### 1.2.2 成型工艺

平板试验件整体成型的工艺流程见图3,采用图4中的成型模具进行成型工艺试验,以摸索并确定初步的工艺过程控制要点及参数。

试验中,树脂常温下注射,注射口压力控制设置为0,出口接真空,压力为-0.1 MPa,待树脂充满之后进行密封包覆,然后随模具一同放入热压罐按一定的



图3 平板试验件 VARTM 成型工艺流程图

Fig. 3 Laminate molding flowchart of VARTM

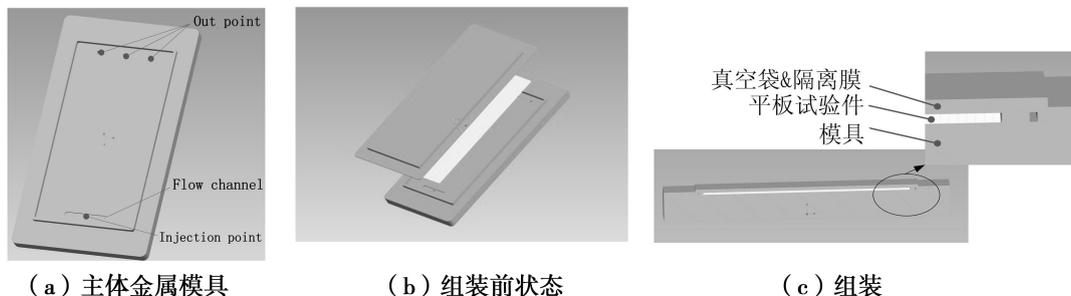


图4 平板试验件 VARTM 工艺成型模具

Fig. 4 VARTM mould of testing laminates

### 1.2.3 试样制备及性能测试

为摸索低黏度树脂与缝编布间的浸润匹配性能和板材的整体性能,对采用 VARTM 工艺制作的平板试验件,在完成内部质量的超声无损检测之后,按平板力学及物理性能测试标准进行了基础性能的测试,

结果见表2。从典型平板试验件的基本性能数据可以得出:(1) VARTM 工艺成型的平板无损伤缺陷率为2.1%,略高于传统的热压罐工艺成型的板材;(2) VARTM 工艺可以使成型的复合材料平板构件仍保持较高的纤维含量。

表2 平板试验件的基本性能

Tab. 2 Properties of testing laminates

拉伸强度/MPa	拉伸模量/GPa	压缩强度/MPa	压缩模量/GPa	弯曲强度/MPa	弯曲模量/GPa	纤维/wt%	密度/g·cm <sup>-3</sup>
390±15	25±1	410±18	25	504	14	66.8~71.4	1.91

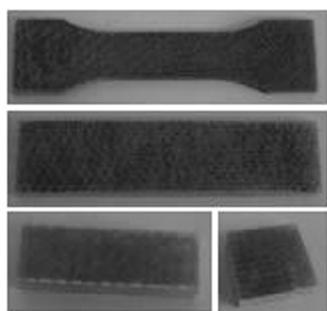


图5 平板试验件性能测试试样

Fig. 5 Testing plates of laminates

## 2 VARTM 工艺过程分析及参数优化

### 2.1 参数化模拟及工艺优化

RTM 工艺的的流动模拟和工艺参数优化是 RTM 工艺的重要内容<sup>[7-9]</sup>。针对贮运发射箱体的典型结构,利用 PAM-RTM 注射工艺模拟软件,对复合材料箱体的 VARTM 工艺过程中的树脂流动进行了模拟。在忽略厚度方向渗透率影响、且不考虑快速流道的基

础上,创建了一简化的薄壁理论模型,进行了有限元分析。

设定树脂黏度  $\mu=0.15 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ,纤维预成型体渗透率  $K=1.0\times 10^{-11} \text{ m}^2$ ,孔隙率为0.5,注射口压力  $P_i=0$ ,出胶口压力  $P_e=-0.1 \text{ MPa}$ 。假设图7中的三种注射模式,分别为:(1)左端面线注射,右端面出胶;(2)中部点注射,两端面出胶;(3)中部线注射,两端面出胶。对整个树脂的渗流、充模情况进行有限元模拟分析和对比,结果见图8。三种方式的充模时间分别为:4 850、4 997、1 196 s,显然第三种方式的树脂流动充模情况较好(图9)。

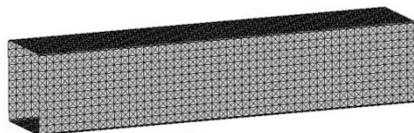
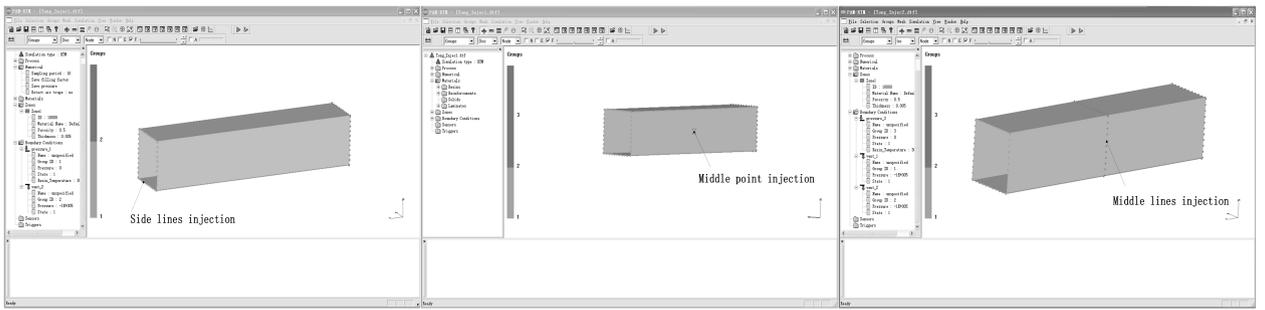


图6 复合材料箱体有限元模型

Fig. 6 FEM model of composite container



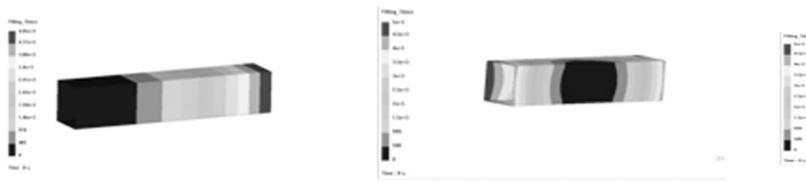
(a)端面线注射

(b)中部点注射

(c)中部线注射

图7 复合材料箱体的三种 VARTM 注射模式

Fig.7 Three injection patterns on composite container



(a)端面线注射

(b)中部点注射

(c)中部线注射

图8 三种不同注射方式下的树脂充模历程图

Fig.8 Filling distributions of time of three injection modes

一个截面内,纤维体积含量也不同。各截面上纤维体积含量的不均匀性,导致了渗透率的不均匀性,再加上快速通道效应等影响,使树脂的流动呈现出“移动前锋”<sup>[10]</sup>不断推进的现象。除此之外,树脂的流动不但有沿纤维方向的流动,也有垂直于纤维方向的流动,这些因素都增加了树脂在缝编玻璃纤维增强体中流动的复杂性。

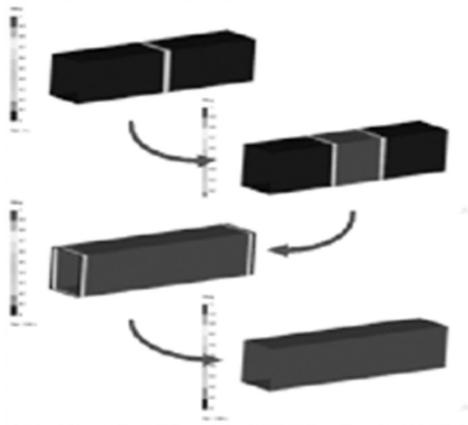


图9 最优注射方式下的充模历程

Fig.9 Filling process of the optimized injection mode

## 2.2 快速通道分析

平板试验中证实,当增强体铺层形成空槽时,树脂会沿着槽线的轨迹迅速流动,相当于空槽位置成为了快速通道,树脂沿快速通道移动,当某区域的四周均有快速通道,且树脂流动迅速汇合时,容易因树脂浸渍不够形成干斑,而快速通道附近则形成富树脂区,VARTM 树脂流动“快速通道”效应模型见图 10。

缝编玻璃纤维中的流动更复杂,在缝编结构的玻璃纤维增强体中,存在着纤维束与纤维束之间较大的沟槽和纤维束内部的间隙两种不同大小的流体通道。每一个截面上其纤维体积含量都是变化的,即使在同宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2012 年 第 4 期

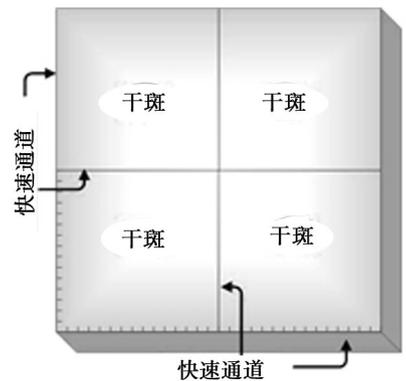


图10 树脂流动“快速通道”效应模型

Fig.10 Throughway model of resin flow

采用阳模时,纤维增强体不易与模具紧密贴合,应尽可能避免小半径部位设计,树脂注射前需确保无架空现象;在铺设导流系统时,可考虑多注胶口或线性注射模式设计<sup>[11]</sup>,以减少充模时间,并使树脂均匀分配。注胶口应选择模具的低点,便于树脂流动时

排出气体。

### 3 复合材料箱体试验件制备

整个复合材料箱体试验件制备采用主体阳模外加辅助真空的形式,首先在主体阳模上铺敷玻璃布增强材料,外部使用隔离材料、导流材料及真空袋膜等包覆,整体采用中部线性注射模式,两端面设置出口并抽真空,待树脂充满之后,再随同模具一起固化。(图 11)。

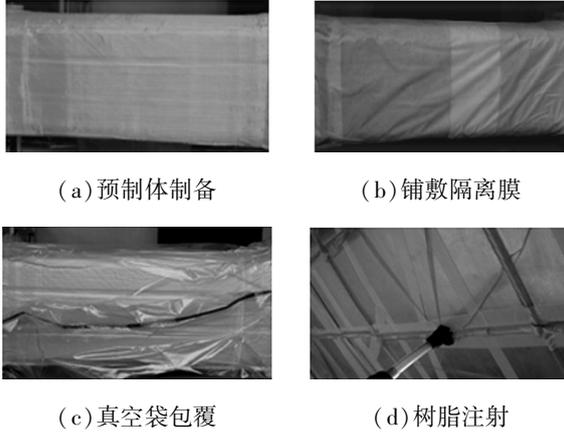


图 11 复合材料箱体的 VARTM 制备流程

Fig. 11 VARTM process of composite container

首次采用主体阳模成型箱体结构形式的试验件时,由于箱体结构模具较复杂,凹槽较多,缝编玻璃纤维布在铺层后抽真空时很难压实,在舵轨部位的纤维与模具之间形成架空区,产生了类似前面描述过的“快速通道”效应,在舵轨处形成了富树脂区,其后的试验中加强该类部位纤维铺覆的压实过程较好地解决了该问题。

在法兰部位(树脂出口)产生少量的点状干斑和部分贫胶区,这是因为法兰部位厚度大、结构复杂,且位于出胶口部位,注射树脂不如进胶口附近充分,形成少量干斑;而固化压实时,树脂从出胶口溢出,造成局部贫胶。所以,在充模完全后允许稍长时间树脂流动,有助于消除出口外的干斑,提高出口处的含胶量,并减少出口处的孔隙。

对试验件进行测量,复合材料箱体相比钢结构箱体减重约 70%,箱体局部取样检测纤维质量分数为 68.2%,内腔尺寸精度较高,内表面光洁。试验表明,VARTM 工艺成型模具需根据试件要求进行设计,高的试件光洁度的前提是模具表面有高的粗糙度,将产

品设计与模具设计相结合,避免不完全加压和局部闭腔现象,有利于提高复合材料产品成型的工艺性能。

### 4 结论

(1)采用 VARTM 工艺可以制造出纤维质量分数达 68% 且整体较为密实的复合材料构件。

(2)工艺过程模拟和参数优化等数字化设计手段,可以为 RTM 最佳注射方案的确定和模具的设计提供有力的辅助,也为先进复合材料制造的低成本化需求提供了参考。

(3)复合材料箱体试验件的制备,验证了贮运发射箱类构件的整体化成型技术的有效性和可行性,为该类构件的快速化、批量化、低成本化生产提出了可供借鉴的制造方案。

### 参考文献

- [1]李健林,赵占辉,王锐臣. 美国 MK41 导弹垂直发射系统技术发展状况分析[J]. 飞航导弹,2005(9):22-24
- [2]郭志成,郑宏健. 先进复合材料技术的研究与发展[J]. 复合材料学报,2003(10):54-57
- [3]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
- [4]范玉青,张丽华. 超大型复合材料机体部件应用技术的发展:飞机制造技术的新跨越[J]. 航空学报,2009,30(3):534-543
- [5]益小苏. 先进复合材料技术研究与发展[M]. 北京:国防工业出版社,2006
- [6]Timothy G G. Advanced composites manufacturing [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997: 426-438
- [7]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
- [8]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
- [9]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
- [10]Liu B, Bicker ton S, Advani S G. Modeling and simulation of resin transfer molding(RTM) -gate control, venting and dry spot prediction. Composites: Part A 27
- [11]曹运红,杨鸿昌. 大尺寸复合材料结构的真空辅助树脂传递模塑加工工艺[J]. 飞航导弹,2005(12):59-63

(编辑 任涛)