

# SCRIMP 成型工艺的研究

邓京兰 祝颖丹 王继辉

(武汉理工大学 430070)

**摘要:** 本文侧重介绍了 SCRIMP 工艺材料的合理选用和树脂分配系统的设计,并以一甲板制作实例简述了 SCRIMP 工艺成型过程。

**关键词:** SCRIMP 成型工艺 高渗透介质 沟槽引流 制作实例

## 1 前言

先进复合材料以其优异的性能用量日趋增加。然而,对于几何形状复杂的大型夹芯和加筋结构件,由于尺寸大、性能要求高,采用缠绕、模压等工艺成型困难,而采用手糊或喷射成型则制品的质量得不到保证,因此传统的成型工艺在成型大型复杂结构件时存在难以逾越的技术障碍,严重影响了复合材料的广泛应用。SCRIMP (Seemann Composite Resin Infusion Molding Process) 成型工艺是近年来在 RTM 工艺基础上发展起来的一种独特的复合材料成型工艺,在国外已成功用于舰船、军事设施、国防工程、航空和民用工业等。SCRIMP 工艺的基本原理是在模具型面上铺放增强材料,将型腔边缘密封严密,在型腔内抽真空,再将树脂通过精心设计的树脂分配系统在真空作用下注入模腔内。和传统的开模成型工艺相比,SCRIMP 成型工艺具有以下优点: 机械性能高:在不增加成本的情况下,与手糊构件相比,SCRIMP 成型构件的强度、刚度或硬度及其它的物理特性可提高 1.5 倍以上。 重复性:采用 SCRIMP 制作的构件,不论是同一构件还是构件与构件间都存在高度的一致性。构件有相对恒定的树脂比,空隙率低,不超过 1%,更容易检测构件缺陷。高度固化的层板可在日光下目测空隙或其它缺陷问题。带有胶衣的夹芯层,不仅可直接看到外表层,还可看到芯层。 重量轻:SCRIMP 成型时树脂消耗量受到严格的控制,其比例几乎由真空值决定,纤维含量可高达 75~80%。无需额外的材料来连接芯材。因此,对强度或刚度要求相同的构件,采用 SCRIMP 工艺制作可节约材料,减轻重量。 环保:这是 SCRIMP 工艺最突出的优点。开模成型时,苯乙烯的挥发量高达 35~45%。SCRIMP 工艺则几乎是闭模成型过程,挥发性有机物和有毒空气污染物均被局限于真空袋中。仅在真空泵排气(可过滤)和打开树脂桶时有微量的挥发物。 成本低,效率高:纤维

含量高,树脂浪费率低于 5%,比开模工艺可节约劳动力 50%以上。在芯材加入的前后,无需等待树脂的预浸和固化,可一次成型大型复杂几何形状的夹芯和加筋结构件。尤其在板中加筋时,材料和人工的节省相当可观。

SCRIMP 成型工艺为制造大型结构/功能件提供了崭新的思路,国际上普遍认为该工艺制造厚壁的大型平面、曲面的层合结构和加筋异型构件等具有非常好的发展前景。

## 2 SCRIMP 成型工艺

SCRIMP 成型工艺在理论上具有显著的优越性,但该工艺对模具、原材料和成型工艺技术有较高的要求。根据树脂的分配系统,可将 SCRIMP 工艺分为两种:一种是高渗透介质型,另一种是沟槽引流型。前者设计相对灵活且简单,但一些材料如剥离层、高渗透介质等不能重复利用,不仅产生了固体废弃物且增加了生产成本,充模速度也相对慢。后者则可克服这些缺点,不需要高渗透介质和剥离材料,沟槽渗透率远远高于渗透介质,充模速度得到大幅度的提高。

### 2.1 模具

在模具表面涂上脱模剂,再涂上胶衣层可改善制品的表观。密封真空袋一般选用尼龙、硅树脂或聚合物薄膜等。密封时,可将真空袋直接与模具边缘密封,或将整个模具密封到真空袋内。在抽真空前,要检查真空袋与模具的气密性,确保无泄漏。

### 2.2 主要原材料

(1) 树脂。适应 SCRIMP 工艺的典型树脂包括低收缩聚酯树脂、乙烯基树脂、环氧树脂、酚醛树脂等低粘度树脂。要求树脂体系粘度低(一般为 150~800 cps),使树脂仅在真空力作用下能够完全浸渍增强材料。不同的工艺对凝胶时间有不同的要求,如有些工艺要求在 35min 内注射完,有些则需要 4h 完成,因此凝胶时间应可变易控,这是注射成功的关键

之一。在浸渍过程中,粘度变化小,固化放热峰值适中。高放热峰会损坏模具甚至成型构件。此外,由于 SCRIMP 工艺中通常有加强筋,树脂应具有较高的延伸性能。

(2) 增强材料。增强材料一般包括 E 玻纤、碳纤维、Kevlar 纤维、Spectra 纤维以及 E 玻纤与其它几种纤维的混杂形式。机织材料不适合于注射工艺,新型的针织材料和平纹单向纤维是较理想的选择。

(3) 高渗透介质。可采用孔隙率高的机织纤维,便于树脂的渗透。

(4) 芯材。一般芯材都在可选范围内,如轻质木

材、PVC、PEI 和其它线性微孔封闭型塑料等。对于开孔型芯材(如蜂窝状),树脂会充满其空穴,加重了制品的重量和成本,因此这类芯材不能选用。

(5) 剥离层。低孔隙率、低渗透率的纤维织物可改善制品的表观,防止真空线粘在制品上。

### 2.3 树脂分配系统的设计

#### (1) 高渗透介质型

高渗透介质型是在模具上先铺设高渗透介质,及一层树脂可浸透的剥离层,再铺覆增强材料,在增强纤维上再铺设剥离层和高渗透介质,然后用真空袋密封,其基本结构如图 1 所示。

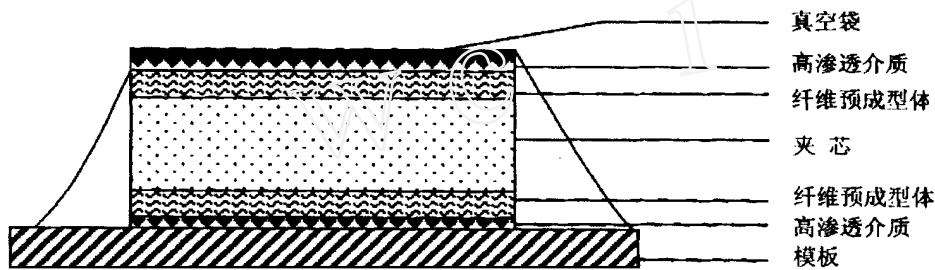


图 1 高渗透介质 SCRIMP 结构

树脂注射过程中,高渗透介质的渗透率远高于剥离层和纤维增强材料的渗透率,浸渍纤维材料的树脂主要是从高渗透介质渗出,因此高渗透介质对充模时间起决定性的作用。剥离层和纤维预成型体不仅有助于脱模,而且加快了树脂充模速度。

#### (2) 沟槽引流型

沟槽引流型适合于制作单面或中间带夹芯的制品。在芯材表面布设快速流道,树脂通过流道迅速充模,基本结构如图 2 所示。

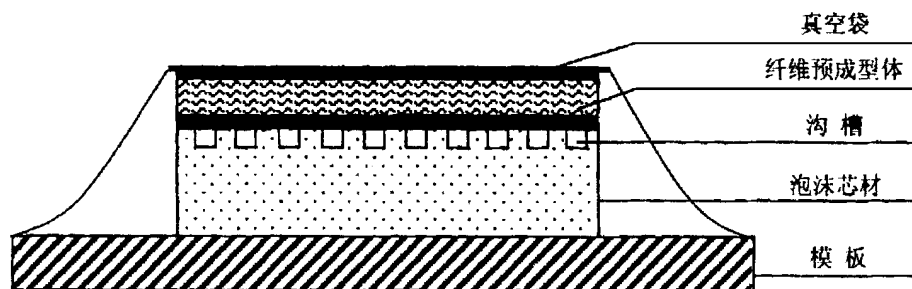


图 2 沟槽引流 SCRIMP 结构

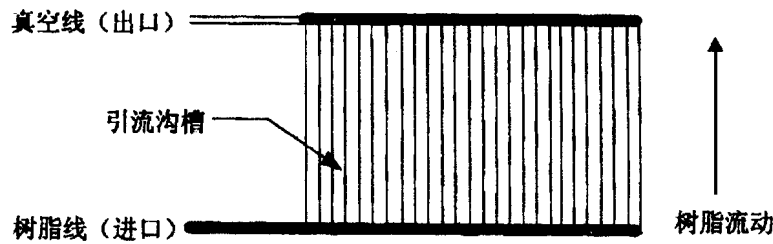
沟槽设计是 SCRIMP 工艺最关键的一步,其数量和尺寸与制品的规格有关。最佳布局要通过理论与实验来设计。真空线、树脂线和沟槽的布置如图 3 所示。

在图 3(a)中,出口的位置对充模时间有影响,与沟槽应相距一定的距离。若出口直接与沟槽相连,由于出口处的渗透率远大于纤维的渗透率,大部分树脂通过沟槽流到出口,而不是流进纤维预成型体。对薄壁构件而言,沟槽末端与出口之间的距离不应

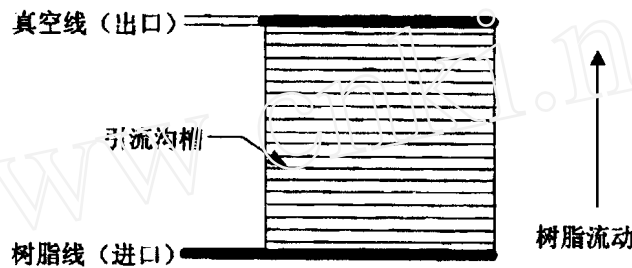
低于沟槽间距的两倍。对于厚壁构件,则与构件的厚度和纤维材料的横向渗透率有关,但比薄壁构件的距离要大。沟槽的尺寸也有一定的限制。沟宽小于 3mm,则不便于机械加工,大于 6mm 则容易造成树脂浪费,甚至引起纤维预成型体在真空压力的作用下陷入沟槽中。因此,较理想的槽宽一般为 3~6mm,沟槽间距为 2.5~7.5cm。

在图 3(b)中,引流槽的设计可更方便控制整个工艺过程,并能最低量的避免树脂的浪费。沟槽间

距最佳为 2.5cm,槽宽为 3.5mm,槽深为 3.5mm。对于简单的面板,考虑面板的宽度没有多大的意义,



(a)



(b)

图 3 真空线、树脂和引流槽的布置

即使有遗漏处也无关紧要。但对于带有夹芯的大型构件,加入如图 4 所示垂直于引流槽的供应槽,则大大提高了树脂的充模速度。实验发现,供应槽间距超过 55cm 时,容易产生速度慢且不均匀的树脂流动前峰;间距小于 30cm 时沟槽间有树脂未达到饱和的

部位,最佳的沟槽间距为 35 ~ 50cm。板可以头尾相接,保持相同的供应槽间距。供应槽一般刻在芯材的顶部、底部和两侧,使树脂可同时供应底层和顶层。

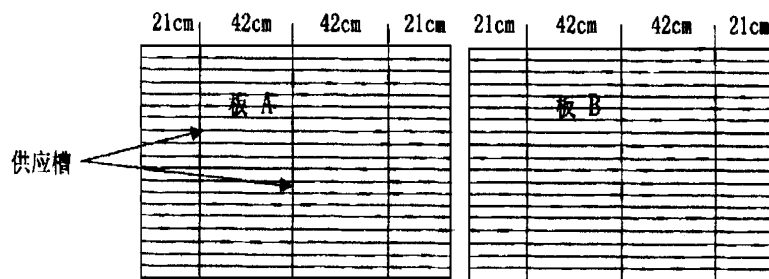


图 4 供应槽的布局

### 3 制作实例

以一带四根纵向筋和三根横向筋的夹芯甲板制作(170cm ×60cm)为例,简述说明 SCRIMP 工艺的基本成型过程。甲板主要由外层(E-玻璃纤维)、PVC 泡沫芯材和内层(E-玻璃纤维)组成。最大的横向筋为刻槽芯材,尺寸为 60cm ×20cm ×20cm,顶部带有一层 E-玻璃纤维和 10 层单向碳纤维。其它的加强筋均为刻槽的高密度 PVC 芯材。

#### 3.1 树脂分配系统

将树脂从贮罐中抽出输入构件,有几种方案可

供选择。可用螺旋管或穿孔管或高渗透材料带制成的流道,或直接通过芯材上的流道输送。本例采用芯材上的流道来输送树脂。在芯材纵向上刻引流槽,间距为 40cm。由于树脂要流过 150cm 的长度,在每一输送流道上至少要一个输送点。输送点的平均间距为 25cm。采用一 T 型附件,树脂只需从输送点朝两边流动 25cm。

甲板形状基本上为一矩形,且以纵向筋为主,故沿宽度方向刻槽最佳,使得树脂可流过纵向筋。若树脂沿长度方向输入,则可能难以控制树脂的流动

路径。为缩短树脂的流动距离,从甲板中心线输入树脂,可产生两个流动前峰,即缩短了一半距离。真

空线要求沿长度方向布置,使树脂在真空作用下从中心向前流动。树脂分配系统结构如图5所示。

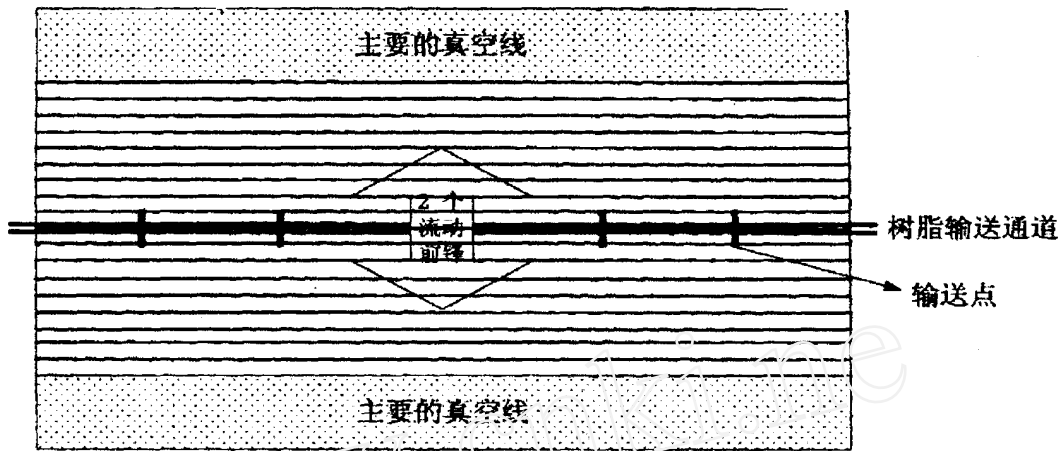


图5 树脂分配系统结构

### 3.2 铺层过程

在模具上先用短切玻纤手糊一层表面毡,这一步十分关键。它可以确保模具无空气泄露,防止制品腐蚀或刺破。表面毡固化后,要检测模具是否能保持真空状态。接着铺放外层。外层为2层E-玻璃纤维,约为5mm厚,层间接缝错开。再放三明治夹芯。每一芯材的顶部、底部和上下两面均事先刻有连续的沟槽。芯材放入后,芯材板间的垂直接缝用树脂基填料填充,以防止树脂在芯材板间任意流动。再将树脂输送流道放在芯材的顶部,流道的排列一定要正确合理。然后可铺放2层E-玻璃纤维组成的内层。至此,甲板的基本层结构已完成。接下来是加强筋的铺放。先放置最大的横梁,再放其它2根横向筋和4根纵向筋。3根纵向筋与最大的横梁相接,形成了含三个不同层和三个不同的树脂流动方向的交汇处。

### 3.2 注射步骤

铺层结束后,在甲板的表面加上剥离层,可获得光滑的制品表面并防止真空线粘在甲板上。再将输送点插入输送流道。在构件的外边缘布置好主要的真空线。加强筋顶部也放置真空线,但彼此独立,必要时可单独关闭。

甲板用真空袋密封,连上真空管,慢慢地抽真空。由于加强筋比较复杂,这一步要特别小心。真空袋放好后,输送点与输送管相连,可直接输送树脂。甲板和加强筋上约有90多个输送点。关闭输送流道,检查甲板的气密性。5min后,压力下降值不得超过12mm水银汞柱。否则须重新检查密封性。

准备好6桶树脂,树脂的凝胶时间为2.5h,平均粘度为400cps。先将3桶树脂注入。树脂催化后,打开甲板中心轴上的第一批输送点,每条流道上同时打开5个。树脂以两个流动前峰均匀地朝甲板两边流动。当树脂到达纵向筋后,打开筋上的输送点,通过控制每根筋上的真空线,使树脂在甲板上比在筋上流得更快。横向筋上有小部分树脂流失,由于量小可忽略,对甲板的整体成型无影响。注射大约持续2.5h,除去真空袋和剥离层后,检查甲板。

## 4 结束语

复合材料是实现结构减重、提高性能的最有效、最便捷的途径。然而居高不下的成本阻碍了复合材料的广泛应用。因此,开展低成本SCRIPM快速成型工艺的研究对推动复合材料的应用有重要的意义,将有力地促进我国低成本高性能复合材料的发展。

### 参考文献

- 1 赵渠森. 材料和工艺在“买得起的复合材料”中的作用. 航空制造技术, 2000, 6: 47~51
- 2 Xiudong Sun, Shoujie Li, and L. James Lee. Mold Filling Analysis in Vacuum - Assisted Resin Transfer Molding. Polymer composites, 1998, 19(6): 807~817
- 3 Xiudong Sun, Shoujie Li, and L. James Lee. Mold Filling Analysis in Vacuum - Assisted Resin Transfer Molding. 1998, 19(6): 818~828
- 4 Gordon Lacy, Belle Gall. A New Vacuum Infusion Process to Manufacture Large Components. 2000: 141~149
- 5 李柏松, 王继辉, 邓京兰. 真空辅助RTM成型技术的研究. 玻璃钢 / 复合材料, 2001, 1: 17~18, 23

(下转第32页)

(3) 复合材料气瓶材料的最大应力发生在环向缠绕层,避免了气瓶纵向断裂的爆破形式,符合安全性要求;

(4) 由于在铺层设计时,纵向缠绕考虑了75%的利用系数,在预紧压力处理后,复合材料气瓶在工作条件下,其环向应力安全系数小于3.5,因此应该采用有限元法对气瓶的铺层进行进一步的优化。

表7 预紧压力对工作条件下应力状态的影响

(单位:MPa)

区域	应力	预紧压力前	预紧压力后
筒身段	Von Mises 应力	244.4/176.6	117.6/345.0
	环向应力	259.0/185.5	67.3/346.3
	径向应力	-4.0/19.5	-5.7/24.5
	轴向应力	147.1/100.8	67.1/104.7
封头段	Von Mises 应力	109.0/75.1	117.6/72.2
	环向应力	112.0/75.3	123.6/67.3
	径向应力	66.6/19.5	84.7/24.5
	轴向应力	8.0/8.0	-8.1/29.5
过渡区	Von Mises 应力	244.4/109.0	117.6/208.6
	环向应力	148.8/38.6	67.3/11.5
	径向应力	90.1/38.6	-5.7/24.5
	轴向应力	286.3/100.7	104.7/179.9

注:表中/左边为铝内衬的应力,右边为复合材料的应力。

## 参考文献

- 1 Z. Hashin. Analysis of Composite Materials - A Survey. J. Appl. Mech. ,1991 ,50(3) :481 ~ 505
- 2 Z. Hashin. The Apherical Inclusion With Imperfect Interface. J. Appl. Mech. ,1991 ,58(2) :444 ~ 449
- 3 J. D. Achenbach, H. Zhu. Effect of Interphases on Micro And Macromechanical Behavior of Hexagonal - Array Fiber Composite. J. Appl. Mech. ,1990 ,57(4) :956 ~ 963
- 4 Tungyang Chen. An Invariant Treatment of Interfacial Discontinuities in Piezoelectric Media. Int. J. Engng. Sci. ,1993 ,31(7) :1061 ~ 1072
- 5 Composite Tanks With Load Sharing Liners Bixler. W. D NASA CR-120918 ,Mar. 1973
- 6 Marries. E. E. & Darm. F. J. Parametric Study of Glass-filament Reinforced Metal Pressure Vessels. NASA CR-54855 ,Apr. 1966 ,Aerojet-Genaral Corp
- 7 Landes. R. E. Glass Fiber Reinforced Metal Pressure Vessel Design Guide NASA CR-120917 July ,1972
- 8 Landes. R. E. Filament-Reinforced Metal Composite Pressure Vessels Evaluation & Perfomance Demonstration NASA CR-134975 ,May ,1976. SCIINC
- 9 Bixel W. D. Fracture Control Method For Composite Tanks With Load-Sharing Liners. NASA CR-134758 ,July ,1975 ,Boeing Co.
- 10 龚挠南、王寿梅. 结构分析的非线性有限元法. 1986 ,11
- 11 王勖成、邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法. 1997. 3
- 12 叶天麒、周天孝. 航空结构有限元分析指南. 1962 ,2

## AUTO-FRETTAGE PRESSURE RESEARCH ON COMPOSITES NATURAL GAS VEHICLE CYLINDERS

Huang Zaiman Jiang Juhui Xue Zhongmin Huang Yusheng

(Beijing FRP Research & Design Institute)

**Abstract :** In this paper ,the auto-frettage pressure of the aluminum liner full wrap composite natural gas cylinders is studied. The elastic plastic process of the composite cylinder materials is systemically analyzed to design the auto-frettage pressure by the AL GOR FEAS method ,and based on the analysis ,the stress distribution of the composite cylinders is confirmed according to the stress analysis of the metal liner and composites adopting the symmetrical stress-strain ,which shows that the auto-frettage pressure design can decrease the maximal tensile stress in the work condition of aluminum liner and increase the fatigue life of composite gas cylinders.

**Key words :** composite materials natural gas cylinders auto-frettage pressure

收稿日期:2001 - 07 - 25

(上接第 43 页)

## STUDY OF SCRIMP MOULDING TECHNOLOGY

Deng Jinglan Zhu Yingdan Wang Jihui

(Wuhan University of Technology)

**Abstract :** The paper puts stress on the description of the selection of materials and design of resin distribution system in SCRIMP and gives an example of deck moulding by SCRIMP.

**Key words :** SCRIMP high penetrating medium resin flowing channel moulding example

收稿日期:2001 - 07 - 25

FRP/CM 2001. No. 5