

# 真空导入模塑工艺树脂流动规律研究

杨金水 肖加余 曾竟成 刘 钧

(国防科学技术大学航天与材料工程学院,长沙 410073)

**文 摘** 研究了导流介质、重力、注射方式和注射管径等工艺参数对真空导入模塑工艺中树脂流动行为的影响。结果表明,真空导入模塑工艺中,主导树脂充模流动速度的是导流介质的渗透率;注射方式改变时,树脂的流动模式和流动速度发生改变;树脂的充模流动速度随着注射管径的增大而增大;树脂的流动倾角越接近竖直方向重力对树脂流动的影响越大。

**关键词** 真空导入模塑工艺,导流介质,树脂流动,达西定律

## Resin Flow Behavior of Vacuum Infusion Molding Process

Yang Jinshui Xiao Jiayu Zeng Jingcheng Liu Jun

(College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

**Abstract** The effect of distribution media, gravity, infusion methods and diameter of infusion pipe on resin flow behavior in vacuum infusion molding process is studied. The results show that the permeability of distribution media has significant effect on resin filling rate, both the flow modes and filling rate of the resin change with resin infusion methods, the resin filling rate increases with the diameter of infusion pipe and the influence of gravity on the resin flow rate increases with obliquity of the resin flow direction.

**Key words** Vacuum infusion molding process, Distribution media, Resin flow, Darcy's law

### 1 前言

真空导入模塑工艺(VMP)是一种新型的大尺寸复合材料制件的低成本液体模塑成型技术(图1)。

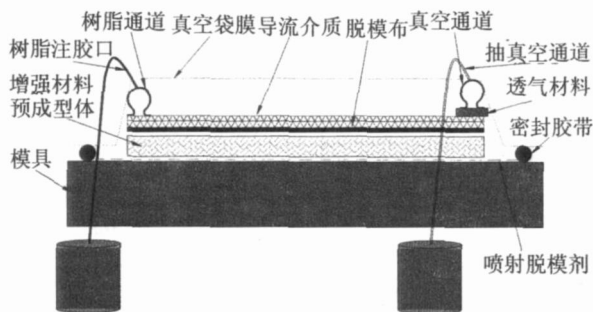


图1 VMP封装示意图

Fig 1 Schematic of VMP setup

VMP是在单面刚性模具上以真空袋膜包覆密封纤维增强材料,真空负压下排除模腔中气体,利用树脂流动、渗透实现树脂对纤维及其织物的浸渍,在室温下固化成型的工艺方法<sup>[1-2]</sup>,VMP成型过程中,确保树脂充分浸润增强材料是保证制品质量的关键,

也是工艺控制的难点。为准确预测树脂流动前沿曲线及压力场分布,合理设置工艺参数,要充分了解VMP中树脂的流动过程及流动规律。本文研究了导流介质、树脂自身重力、注射方式和注射管径等参数对VMP过程的影响。

### 2 实验

改变导流介质等工艺参数,根据注射过程中树脂流动前沿对时间的关系,研究工艺参数对VMP中树脂充模流动过程的影响。增强材料为玻璃布,注射树脂为不饱和聚酯树脂,详见表1。

表1 实验材料

Tab 1 Materials for experiment

名称	规格	状态	厂家
不饱和聚酯	LSP-8020B	淡黄色液体	韩国 CRAY VALLEY 公司
玻璃布	EKB400	织物	常州宏发土工织物有限公司
真空袋膜	ECONOLON	白色薄膜	Airtech公司
导流介质	GreenFow 7541	绿色网格布	Airtech公司
脱模布	Econo Ply J	花白布	Airtech公司

收稿日期:2007-04-16;修回日期:2007-05-15

作者简介:杨金水,1982年出生,硕士研究生,主要从事聚合物基复合材料成型工艺的研究工作

自制实验装置与图 1 相似,只是底面模具改为透明钢化玻璃平板,安装在可变倾角的自制木桌上,以便于观察树脂的流动情况。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 树脂流动模型的建立

在 VMP 过程中,树脂在模腔内的流动可看作不可压缩流体在多孔介质中的长程渗流,符合 Darcy 定律,其流动方程为<sup>[3]</sup>:

$$\mathbf{u} = -\frac{\mathbf{K}}{\mu} \cdot \nabla p \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{u}$  为表面流动速度,  $\nabla p$  为压力梯度,  $\mu$  为树脂黏度,  $\mathbf{K}$  为渗透率张量。在三维流场和笛卡儿坐标下,方程 (1) 可以展开为:

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial p}{\partial z} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $u$ ,  $v$  和  $w$  是速度分量,  $K_{ij}$  ( $i, j = x, y, z$ ) 是笛卡儿坐标系下渗透率分量。假设树脂为不可压缩流体,则连续性方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

对方程 (3) 进行区域积分

$$\iiint_V \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dV = 0 \quad (4)$$

根据高斯定理<sup>[4]</sup>,控制体积分可以转化为控制表面积分,因此方程 (4) 变为

$$\iint_S \{n_x, n_y, n_z\} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} dS = 0 \quad (5)$$

式中  $n_x$ ,  $n_y$  和  $n_z$  是积分表面的方向矢量分量。把方程 (2) 代入方程 (5) 得

$$\iint_S [n_x, n_y, n_z] \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial p}{\partial z} \end{Bmatrix} dS = 0 \quad (6)$$

方程 (6) 是基于质量平衡的方程,利用方程 (6) 可以求解流体流过各向异性多孔介质的问题。

#### 3.2 导流介质对树脂流动的影响

VMP 利用真空负压吸注树脂,吸注压力 0.1 MPa,树脂流动速度很难满足成型工艺要求,因此,需要在增强材料铺层中加入高渗透率导流介质来提高树脂流动速度,导流介质和增强体之间用一层很薄的脱模布隔离。树脂在两种渗透率差别很大的多孔介

质中流动,比 LCM 工艺中的流动更复杂。

在 LCM 成型过程中,树脂仅在增强体中流动,见图 2(a)。根据 Cogswell 的研究<sup>[5]</sup>,树脂在增强体中的流动分为四种类型:树脂渗透和沿着纤维方向的流动、横向流动、层内剪切流动和层间共滑移。在 VMP 中,树脂在导流介质和增强体中同时流动,树脂在导流介质中的流动速率大于在增强材料中的,树脂沿厚度方向不断从导流介质向增强材料渗透,与上述四种类型的流动一起汇合于增强体中,形成独特的流动模式,如图 2(b) 所示,图中  $H$  为增强材料预成型体的厚度,  $h$  为 VMP 中导流介质的厚度。

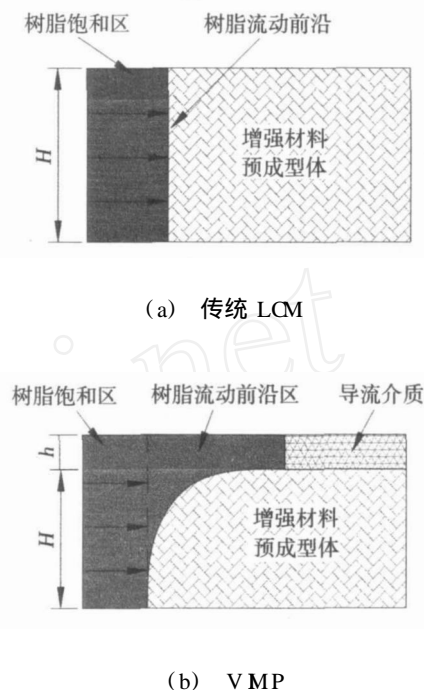


图 2 传统 LCM 工艺和 VMP 树脂流动模式  
Fig 2 Flow mode of conventional LCM and VMP

由表 2 可看出,导流介质一方面影响树脂的流动模式,另一方面影响树脂的流动速度。由此可知,导流介质主导着 VMP 树脂的充模流动速度,而且,两种铺放方式导流介质都可以提高树脂的充模流动速度,减少充模时间。

VMP 中树脂的流动控制方程可用式 (6) 来表示,只是导流介质和增强体区的渗透率张量不同。由表 3 可知,导流介质和增强材料的单向面内渗透率分别为  $2.4 \times 10^{-9} \text{ m}^2$  和  $1.66 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ ,根据混合定律<sup>[6]</sup>计算得导流介质和增强材料混合后模腔内总的渗透率为  $6.12 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ ,而实际测量值为  $1.82 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ ,表明模腔内总的渗透率张量并不是两者渗透率的简单混合,即并不遵守混合定律。结合表 2 可知,VMP 中,主导树脂充模流动速度的是导流介质的渗透率,此结论与文献 [7~8] 报道基本一致。

表 2 导流介质对 VMP树脂充模过程的影响

Tab 2 Influence of distribution media on VMP molding filling

序号	增强材料层数	导流介质	充模时间 /s
1	6层	导流介质铺在增强体之上	75
2	6层	导流介质夹在增强材料中	82
3	6层	无导流介质	2842

表 3 材料渗透率

Tab 3 Permeability of materials  $m^2$

材 料	实验值	据混合定律计算值
导流介质	$2.4 \times 10^{-9}$	-
增强材料	$1.66 \times 10^{-10}$	-
导流介质 + 增强材料	$1.82 \times 10^{-9}$	$6.12 \times 10^{-10}$

### 3.3 注射方式对树脂流动的影响

树脂的注射方式决定着树脂的流动模式,从而影响树脂充模流动时间。VMP常用的注射方式及相应的流动模式很复杂(表 4),但可以预测理想情况或总的流动趋势。

表 4 注射方式及相应的流动模式

Tab 4 Infusion methods with flow modes

注射方式	流动模式	注射方式	流动模式
中心注射	径向流动	多边注射	混合流动
线型注射	单向流动	混合注射	混合流动
外围注射	混合流动		

线型注射树脂单向流动,由式(1)得其流动方程为

$$u = -\frac{K \cdot p}{\mu l} \quad (7)$$

式中,  $l$  为树脂流动前沿距离。

中心注射树脂从模腔中心一点源注入,呈径向流动,直至充满整个模腔。此时,可采用 Darcy 定律的径向形式来表达:

$$Q_r = -\frac{KA}{\mu} \cdot \frac{dp}{dr} = -\frac{K}{\mu} \cdot 2 \cdot rh \cdot \frac{dp}{dr} \quad (8)$$

式中,  $Q_r$  为树脂体积流量,  $A$  为树脂通道横截面积,  $h$  为模腔厚度,  $r$  为树脂流动前沿半径。

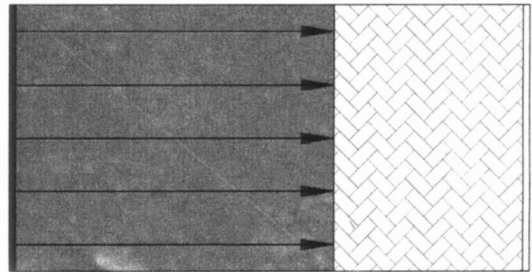
注射压力恒定时,假设树脂遵循质量守恒定律,那么由式(7)和式(8)可推导出线型注射和中心注射的充模时间分别为

$$t_l = \frac{\mu}{2Kp_{inj}} \cdot x_l^2 \quad (9)$$

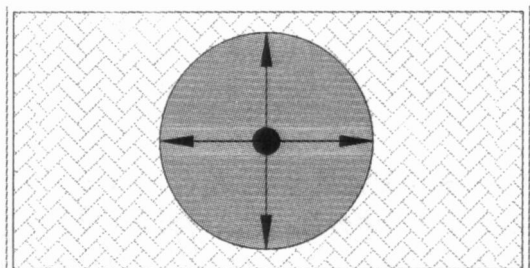
$$t_c = \frac{\mu}{2Kp_{inj}} \left[ \frac{2}{\kappa} \ln \frac{\kappa}{r_{inj}} - \frac{1}{2} (\frac{2}{\kappa} - \frac{2}{r_{inj}}) \right] \quad (10)$$

式中,  $t_l$ 、 $t_c$  分别为线型注射和中心注射的充模时间,  $\kappa$  为增强材料孔隙率,  $p_{inj}$  为注射压力,  $x_l$ 、 $\kappa$  分别为线型注射和中心注射的浸润距离和浸润半径,  $r_{inj}$  为中心注射口半径。

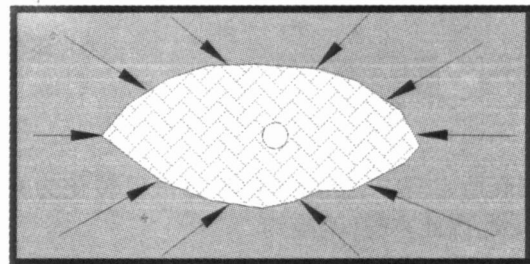
注射方式如图 3 所示。模腔尺寸为  $700 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ ,增强材料渗透率为  $1.66 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ ,树脂黏度为  $160 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,孔隙率为 0.56,注射口半径为  $60 \text{ mm}$ ,真空负压为  $0.98 \text{ MPa}$ 时,在无导流介质情况下通过实验和解析方法研究树脂的流动充模时间,结果见表 5。



(a) 线型注射



(b) 中心注射



(c) 外围注射

图 3 注射方式示意图

Fig 3 Schematic of infusion methods

由表 5 中可知,相同的充模面积,线型注射需要的充模时间几倍于中心注射,实验结果(4倍)与理论计算值(3倍)基本一致。对于相同的注射方式,实验值与计算值偏差较大:线型注射实验值是计算值的 2 倍,中心注射实验值是计算值的 1.6 倍,这是由于实验的复杂性造成的,包括注射过程的非等温性、树脂黏度的非恒定性、充模过程的非稳定性。

表 5 注射方式对 VMP树脂充模过程的影响

Tab 5 Influence of infusion methods on VMP molding filling

注射方式	充模时间 /s	
	实验值	计算值
线型注射	2842	1352
中心注射	696	431
外围注射	218	-

由表 5 可知,实验测得外围注射树脂的充模时间仅为中心注射的 1/3,而且充模面积越大两者充模时间相差越明显,这是由于真空负压恒定时,中心注射的注射口周长决定着树脂的最大体积流量,而外围注射的外围周长形成一个大的注射口,其周长是中心注射口的几倍甚至几十倍,因此,任意时刻树脂的最大体积流量都几倍于中心注射,在充模面积相同的情况下,外围注射的流动充模时间成倍地减少。

综上所述,注射方式改变时,树脂的流动模式和流动速度发生改变。

### 3.4 注射管径对树脂流动的影响

改变注射管直径,采用线型方式分别注射相同厚度相同面积(1 000 mm × 700 mm)的增强体,用 1 000 mm × 300 mm 的导流布引流,树脂沿 700 mm 方向流动,得到注射管径和充模时间的关系如表 6 所示。

表 6 注射管径对 VMP 树脂充模过程的影响

Tab 6 Influence of infusion pipe's diameter on VMP molding filling

注射管直径 /mm	充模时间 /s
8	882
10	645
12	496

由表 6 可知,树脂充模时间随着注射管径的增大而减小,说明树脂充模流动速度随着注射管直径的增大而增大;图 4 表示不同注射管径下树脂充模距离与充模时间的关系,结合表 6 可知,注射管径由 8 mm 增大到 10 mm 时充模时间降低了 237 s,而注射管径由 10 mm 增大到 12 mm 时充模时间的仅降低了 149 s,表明树脂充模流动速度的增幅随着注射管径的增大而减小,这是由于 VMP 中树脂通道由两部分组成:导入树脂的注射管和增强体中由孔隙构成的有效树脂通道,树脂通过注射管进入增强体相当于流体通过横截面的管道。

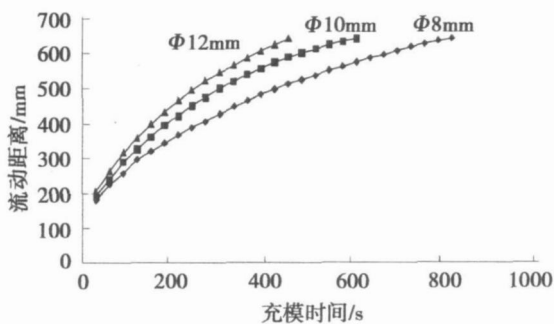


图 4 注射管径对树脂流动的影响

Fig 4 Diameter of infusion pipe as a function of resin flow rate

由式 (8) 可知,真空负压恒定时,树脂通道横截面积越大单位时间内树脂的体积流量越大。注射管径增大时,一方面某一时刻由注射管导入模腔的树脂体积流量增大,另一方面树脂在增强体中的体积流量受到有效树脂通道的限制,所以注射管径的增大虽然能够提高树脂的充模流动速度,但不能无限的提高。

因此,为了得到良好的提速效果,应同时增大注射管和增强体有效树脂通道的横截面积。依此原理,大面积制品成型中可以采用多点多管注射的方式来提高树脂的充模流动速度,减少充模时间。

### 3.5 重力对树脂流动的影响

VMP 树脂单向流动方程如式 (7),考虑重力影响时,压力梯度

$$P = P_{in} - P_{out} - P_c - P_g$$

式中,  $P_{in}$  为注射口压力,  $P_{out}$  为树脂流动前沿压力,  $P_c$  为毛细管压力,  $P_g$  为树脂流动方向上自身重力产生的压力。

树脂重力对树脂流动有两个方面的作用:阻力和推力。对树脂流动有影响的主要是重力在树脂流动方向上的分力,其大小与树脂流动倾角有关,树脂流动倾角是树脂流动方向与水平方向之间的夹角,如图 5 所示。树脂向上爬坡 ( $0^\circ < \theta < 180^\circ$ ) 时,重力表现为阻力;树脂向下流动 ( $180^\circ < \theta < 360^\circ$ ) 时,重力产生推力作用;树脂水平流动 ( $\theta = 0$  或  $180^\circ$ ) 时,重力作用可以忽略不计。对树脂流动产生作用的重力可表示为:

$$G_F = \frac{G}{\sin \theta} \quad (11)$$

式中,  $G$  为已注射树脂的重力。

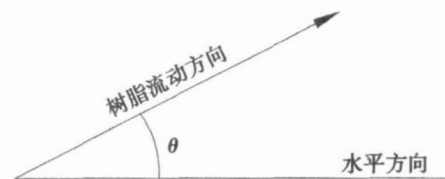


图 5 树脂流动倾角示意图

Fig 5 Schematic of resin flow obliquity

由式 (11) 可知,  $\sin \theta$  等于 1 时,重力的阻力作用最大,等于 -1 时,重力的推力作用最大。这与实验结果相符,如图 6 所示,树脂流动倾角越接近  $90^\circ$ ;树脂的平均流动速度越小,充模时间越长;相反,树脂流动倾角越接近  $270^\circ$  ( $-90^\circ$ ),树脂的平均流动速度越快,充模时间越短。

由图 6 还可看出,树脂浸润距离小于 400 mm 时,树脂流动倾角为  $90^\circ$  和  $-90^\circ$  时的充模时间相差

小于 30 s,重力的影响可以忽略不计;而当浸润距离达到 640 mm时,两倾角下的充模时间之差达到 120 s,重力的影响明显增大,说明随着树脂浸润高度的增加,重力的影响增大。对树脂竖直(流动倾角为 90°)爬升能力的研究表明,树脂的密度、黏度和增强材料的渗透率决定着树脂的爬升能力,不同的材料体系树脂的爬升能力不同。

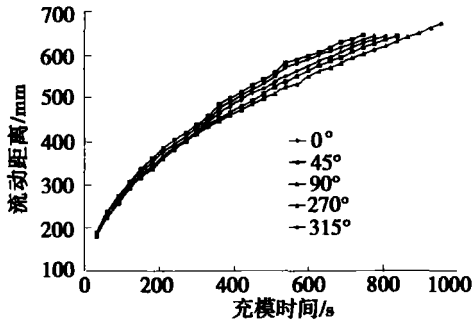


图 6 重力对树脂流动的影响

Fig 6 Gravity as a function of resin flow rate

对成型制品的考察发现,树脂流动倾角为 270°、315°的制品中干斑、白点等缺陷明显多于 0°、45°、90°的制品,这是由于重力作用导致树脂流动不均匀,包裹气泡形成缺陷,见图 7、图 8。

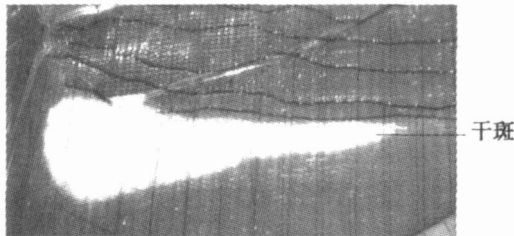


图 7 干斑照片图

Fig 7 Photograph of dry spot

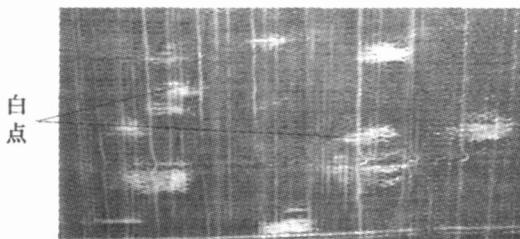


图 8 白点照片

Fig 8 Photograph of white dot

考虑重力对制品性能的影响,VMP注射时树脂应由制品底部向顶部导入;同时,树脂桶应低于制品最低点放置,否则,容易产生树脂富集,影响制品性能。

#### 4 结论

(1)VMP中,主导树脂充模流动速度的是导流介质的渗透率;导流介质能够提高树脂的充模流动速度,减少充模时间;且导流介质铺在增强体之上或夹在增强材料中都能起到相同的提速效果。

(2)注射方式改变时,树脂的流动模式和流动速度发生改变。

(3)树脂的充模速度随着注射管径的增大而增大。

(4)树脂的流动倾角越接近竖直方向,重力对树脂流动的影响越大,重力的作用随着爬升高度或降低高度的增加而增大。

#### 参考文献

- 1 赵渠森,赵攀峰.真空辅助成型工艺(VAR)研究.纤维复合材料,2002;(1):42~46
- 2 Correia N C,Robitaille F,Long A C Analysis of the vacuum infusion moulding process: I Analytical formulation Composites,2005; PartA: 1 645~1 656
- 3 贝尔,李竟生,陈希译.多孔介质流体动力学.北京:中国建筑工业出版社,1998
- 4 Dong Chensong (Jonathan). Development of a process model for the vacuum assisted resin transfer molding simulation by the response surface method Composites,2006; Part A: 1 316~1 324
- 5 Cogswell F N. The processing science of thermoplastic structural composites International Polym. Proc.,1987; 1 (4): 157~162
- 6 Cillis R D, Caputo C D. Affordable approach to the production of complex aerospace composite components via resin transfer molding In: Proc of 43<sup>rd</sup> international SAMPE symposium, 1998: 1 710~1 714
- 7 Sun X D, Li S J, Lee L J. Molding filling analysis in vacuum assistant resin transfer molding Polymer Composites, 1998; 19 (6): 807~810
- 8 Zhu Yingdan, Wang Jihui, Yang Zui Vacuum infusion molding process PartI: VMP based on a high 2 permeable medium. Journal of Wuhan University of Technology, 2003; 18 (3): 72~75

(编辑 吴坚)